

Gilson Jorge Alves

2º Ciclo de Estudos em Sistema de Informação Geográfica e Ordenamento do Território

Aplicação dos Sistemas de Informação Geográfica nas energias renováveis: o potencial  
da energia solar na ilha de São Vicente – Cabo Verde

2013

Orientador: Professor Doutor José Augusto Teixeira

Coorientador: Professor Doutor António Alberto Gomes

Classificação: Ciclo de estudos:

Dissertação/relatório/ Projeto/IPP:

## AGRADECIMENTOS

A presente dissertação é o culminar de um longo percurso, que contou com a colaboração inestimável de várias pessoas e instituições, e que não poderia deixar de prestar os meus sinceros e merecido agradecimento.

Em primeiro lugar aos meus orientadores, Professor Doutor José Teixeira e o Professor Doutor António Alberto Gomes, pela sabia orientação, sugestões, críticas, revisão e estruturação do trabalho, pela disponibilidade e empenho constante, e transmissão do seus conhecimentos que inequivocamente contribuíram para a conclusão desta etapa.

Aos restantes professores do Mestrado em sistemas de informação geográfica e ordenamento do território da FLUP, que oportunamente se disponibilizaram em ajudar na realização deste trabalho.

À equipa da Universidade do Porto coordenadora do projeto Mundus ACP I, por todo o apoio e auxílio prestado, ao longo do processo que antecedeu a minha mobilidade e durante a minha estadia, na universidade do Porto.

Aos meus colegas do MSIGOT 2011/2012, pelo espírito de entre ajuda, amizade ao longo do Mestrado.

Aos meus amigos, com quem partilhamos alojamento, Eric Lima, Elanice Lima e Marcionira Delgado, pelo companheirismo, amizade. Obrigado pela vossa amizade, ajuda prestada.

Aos meus amigos e colegas do projeto Mundus ACP I, pelo companheirismo, trocas de ideias, e ajuda prestada durante a nossa mobilidade.

Aos meus ex-colegas de trabalho e amigos do Ministério do Ambiente Habitação e Ordenamento do Território, em especial na pessoa Wagner Sá Nogueira, pela pronta resposta e eficiência no fornecimento dos dados que eu solicitava.

À minha mãe e familiares, pelo incentivo, ajuda, compreensão, e carinho.

A minha palavra de gratidão é extensiva a todos aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para que o Mestrado tornasse realidade<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> A presente dissertação encontra-se redigida pelo novo acordo ortográfico português

## RESUMO

A presente dissertação, tem como foco principal a aplicação dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) ao estudo das energias renováveis, tendo como caso avaliar o potencial solar na ilha de São Vicente do arquipélago de Cabo Verde.

A energia do sol é a principal fonte de energia renovável, e está disponível em quase todas as regiões do planeta. Quantificar o potencial energético solar de um lugar ou região é indispensável, para avaliar as potencialidades de produção de energia fotovoltaica. Outro fator importante prende-se com ordenamento territorial associado à exploração desses recursos energéticos, pelo que devem ser avaliadas as condições técnicas, ambientais e económicas, quando se pretende instalar parques para a produção de energia fotovoltaica.

Assim, neste trabalho foram aplicadas as ferramentas SIG, para quantificar a radiação solar mensal e anual da ilha de São Vicente, arquipélago de Cabo Verde, através do modelo *Solar Analyst*. Numa segunda fase, aplicou-se a técnica de análise multicritério em combinação com os SIGs para definir as áreas mais favoráveis para a instalação de parques de produção de energia elétrica a partir da energia solar. Para o cálculo da radiação solar na ilha de São de Vicente, utilizou-se o modelo digital de terreno (MDT) e a latitude da ilha como parâmetros de entrada ao modelo. Para a análise multicritério definiram-se um conjunto de critérios que devem ser considerados na implementação de parques solares, nomeadamente, a disponibilidade de radiação solar existente na área, a distância à rede de transporte de energia elétrica e à rede viária, o declive do terreno, o uso e ocupação do solo e a proximidade às linhas de água. Para auxiliar na atribuição dos pesos aos critérios utilizados na análise aplicou-se a método *Analytic Hierarchy Process* (AHP). As áreas resultantes do processo da análise multicritério, foram confrontadas com a Carta de Condicionantes do esquema regional de ordenamento da ilha de São Vicente, aferindo a conformidade das propostas e reajustes subsequentes, de modo a obter os resultados finais.

**Palavras-chaves:** Radiação solar, SIG, parques solar, análise multicritério, energia fotovoltaica.

## **ABSTRACT**

This dissertation focuses primarily on the application of geographic information systems (GIS) in renewable energy, with the case study the solar potential on the island of São Vicente in the Cape Verde archipelago.

Energy from the sun is the main source of renewable energy, and available in almost all regions of the planet. Quantify the solar energy potential of a place or region is essential for the production of photovoltaic energy. Another important factor relates to spatial planning concerning with the exploration of this energy resource by photovoltaic plants. Which should be evaluated by the technical, environmental and economic.

Thus, this work applies GIS tools to quantify the monthly and annual solar radiation of the island of São Vicente, Cape Verde Islands, through the Solar Analyst model. On a second phase applied the technique of multicriteria analysis in combination with GIS to define the most favorable areas for the installation of plants photovoltaic electricity production. For the calculation of solar radiation on the island of São Vicente, it was used a digital terrain model (DTM) and the latitude of the island as input parameters to the model. To multicriteria analysis it were defined a set of criteria that should be considered in the implementation of photovoltaic plants, including the availability of solar radiation existing in the area, the distance to the transmission network and power of the road network, the slope of the terrain, the land cover, and the proximity to water lines. To assist in the assignment of weights to the criteria used in the analysis method was applied the Analytic Hierarchy Process (AHP).

The resulting areas from the process of multicriteria analysis, was confronted with the conditioning map of regional planning scheme from the island of São Vicente, for compliance review and adjustments in order to obtain the final results.

**Key-words:** Solar radiation, GIS, solar plants, multicriteria analysis, photovoltaic.

# ACRÓNIMOS

ECREEE - ECOWAS Regional Centre for Renewable Energy and Energy Efficiency

EEM – Empresa de Eletricidade da Madeira

EROT – Esquema Regional de Ordenamento do Território

ESRI - Environmental Systems Research Institute

FER – Fontes de Energias Renováveis

MDT – Modelo Digital de Terreno

MDS – Modelo Digital de Superfície

MWh – Megawatt por Hora

NERL - National Renewable Energy Laboratory

PERCV – Plano Energético Renovável de Cabo Verde

PV – fotovoltaic

kWh – Quilowatt por Hora

REN – Rede Elétrica Nacional

SIG – Sistema de Informação de Geográfica

W – Watt

WARM - Wind Ressources Assessment Model

# INDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>ii</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iv</b>
<b>ACRÓNIMOS.....</b>	<b>v</b>
<b>INDICE GERAL .....</b>	<b>vi</b>
<b>INDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>INDICE DE TABELAS .....</b>	<b>x</b>
<b>Capítulo I – Introdução .....</b>	<b>11</b>
1.1 Enquadramento do tema.....	11
1.2 Objetivos .....	13
1.3 Estrutura da dissertação.....	13
1.4 Metodologia geral seguida na dissertação.....	15
1.5 Enquadramento Geográfico.....	18
1.5.1 Localização geográfica de São Vicente no arquipélago de Cabo Verde.....	20
1.5.2 Caracterização orográfica da ilha de S. Vicente.....	20
1.5.3 Caracterização climática da ilha de S. Vicente .....	24
<b>Capítulo II. Fundamentação teórica .....</b>	<b>27</b>
2.1 Conceito e considerações gerais sobre energias renováveis.....	27
2.1.2 Principais fontes de energias renováveis.....	28
2.1.2.1 Energia Solar .....	29
2.2 Aplicações de SIG em Sistemas energéticos.....	31
2.2.1 Aplicações de SIG Redes Elétricas .....	31
2.2.2 Aplicação de SIG em Energias Renováveis .....	36
2.2.2.1 Considerações gerais .....	36
2.2.2.2 Aplicações em energia eólica e solar .....	36
<b>Capítulo III. Avaliação do potencial da energia solar na ilha de São Vicente .....</b>	<b>41</b>
3.1 Caraterização do sistema energético de Cabo Verde .....	41
3.1.1 Potência energética instalada em Cabo Verde .....	42
3.1.2 Sistema energético da ilha de São Vicente.....	45

3.2 Cálculo da radiação solar .....	46
3.2.1 Modelos de cálculo da radiação solar.....	46
3.3 Metodologia para cálculo da radiação solar na ilha de São Vicente .....	50
3.3.1 Pré-processamento de dados para construção do modelo digital de terreno (MDT).....	50
3.3.2 Modelo utilizado no cálculo da radiação solar na ilha de São Vicente .....	51
3.3.3 Resultados .....	56
3.3.3.1 Radiação Solar Mensal.....	56
3.3.3.2 Radiação solar Anual em São Vicente .....	58
<b>Capítulo IV. Análise Multicritério para localizar áreas favoráveis á instalação de parques solar na ilha de São Vicente .....</b>	<b>60</b>
4.1 Princípios básicos da avaliação multicritério .....	60
4.2 Metodologia .....	62
4.2.1 Pré-processamento de dados .....	64
4.2.1.1 Mapa de ocupação do Solo.....	64
4.2.1.2 Linhas de transmissão de energia elétrica .....	67
4.2.1.3 Rede viária e Rede Hidrográfica .....	67
4.3 Processamento dos dados para localização de áreas favoráveis para instalação de parques solar .....	69
4.4 Resultados preliminares .....	73
4.4.1 Áreas favoráveis iniciais .....	73
4.5 Análise de conformidade entre as areias favoráveis iniciais e a carta de condicionantes do EROT .....	74
4.6 Resultados finais .....	76
<b>5. Conclusão e perspetivas futuras .....</b>	<b>80</b>
<i>Bibliografia .....</i>	<b>82</b>
<i>Anexos.....</i>	<b>88</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema conceptual da organização das diversas fases de trabalho seguidas ao longo desta dissertação.....	15
Figura 2: Enquadramento geográfico do arquipélago de Cabo Verde .....	19
Figura 3: Enquadramento geográfico da ilha de São Vicente no arquipélago de Cabo Verde ...	20
Figura 4: Maciço Residual (EROT, 2012) .....	21
Figura 5: Cone vulcânico do Pico do Vento (EROT, 2012) .....	22
Figura 6: Leito de barranco amplo (EROT, 2012) .....	23
Figura 7: Dunas rampantes (EROT, 2012).....	23
Figura 8: Velocidade média anual do vento na ilha de São Vicente entre os anos de 2000 a 2012 .....	25
Figura 9: Variação média anual da temperatura entre 1960 a 2010 nas cidades do Mindelo, Praia e a ilha do Sal (A. Rocha et al., 2011).....	25
Figura 10: Temperaturas médias mínimas entre 1989 a 2009 da ilha de São Vicente. Dados da estação anemométrica do Mindelo (EROT, 2012) .....	26
Figura 11 Fontes de energias naturais correntes na terra, e as FER que delas derivam. Adaptado de (Twidell & Weir, 2006).....	28
Figura 12: Componentes e comportamento da radiação solar na atmosfera terrestre. Adaptado de (Twidell & Weir, 2006).....	29
Figura 13: Elementos que constituem uma rede de distribuição elétrica .....	31
Figura 14: Esquema conceptual de uma base de dados SIG aplicado no sistema energético. Adaptado de: (Nawaz-ul-Huda, Burke, Azam, & Naz, 2012).....	33
Figura 15: SIG da rede elétrica da ilha da Madeira (EEM, 2005).....	35
Figura 16: Média da radiação solar global na ilha de Santiago obtido partir da aplicação da SolarGIS .....	37
Figura 17: Velocidade média do vento calculado a partir do modelo SolarGIS na ilha de Santiago a 10 metros de solo.....	37
Figura 18: Radiação Solar Global no arquipélago de Cabo Verde em kWh/m <sup>2</sup> (PERCV, 2011).....	40



Figura 19: Evolução da taxa de cobertura da rede elétrica entre 2003 a 2011 para o arquipélago de Cabo Verde (Fonte: Electra SA, 2012).....	41
Figura 20: Localização das centrais produtoras nas diferentes ilhas e municípios de Cabo Verde (PERCV, 2011) .....	42
Figura 21: Potência instalada e produção de eletricidade por tipo de fonte (PERCV, 2011) .....	43
Figura 22: Evolução da produção de energia em percentagem por tipo de fonte entre 2007 a 2011.....	44
Figura 23: Consumo de energia num dia de inverno (15 de Janeiro) e num dia do verão (15 de Agosto) (Segurado et al., 2011) .....	45
Figura 24 Cálculo da altura dos edifícios partir de dados do LiDAR. Adaptado de (Kassner et al., 2008).....	49
Figura 25: Procedimento metodológico seguido para construção do MDT da ilha de São Vicente .....	50
Figura 26: Gráficos dos parâmetros definidos no cálculo da radiação solar: a) Sunmap; b) viewshed; c) skymap .....	52
Figura 27: Procedimento metodológico para o cálculo da radiação solar em Wh/m <sup>2</sup> na ilha de São Vicente .....	55
Figura 28: Radiação solar em kWh/m <sup>2</sup> nos meses de Janeiro a Junho de 2012 .....	56
Figura 29: Radiação solar kWh/m <sup>2</sup> nos meses de Julho a Dezembro de 2012.....	57
Figura 30: Radiação solar anual (2012) na ilha de São Vicente em kWh/m <sup>2</sup> .....	58
Figura 31: Esquema metodológico seguido na criação do mapa de uso de solo.....	64
Figura 32: Carta de ocupação do solo da ilha de São Vicente .....	65
Figura 33 Catalogo utilizado para definir as classes de uso e ocupação solo na ilha de São Vicente .....	66
Figura 34 Esquema metodológico seguido para desenhar as Linhas de Transmissão de energia67	
Figura 35: Processo metodológico seguido para extração da rede viária e a rede hidrográfica..	68
Figura 36 Fluxograma de procedimentos metodológicos para localização de áreas favoráveis iniciais para a instalação de parques solar.....	69

Figura 37: Critérios normalizados. ....	71
Figura 38 Áreas favoráveis iniciais para instalação de parques solares .....	74
Figura 39 Procedimentos seguidos para salvaguardar as áreas protegidas e a distância as estradas .....	75
Figura 40 Áreas favoráveis finais.....	78

## **INDICE DE TABELAS**

Tabela 1 Vantagens e desvantagens da produção de energia solar. Adaptado de: (Mateus & Costa, 2004) .....	31
Tabela 2: Evolução da produção de energia elétrica em Cabo Verde por tipo de fonte em KWh entre os anos 2007 a 2011 (ELECTRA, 2012).....	44
Tabela 3 Escala de números absolutos, que determinam a importância dos critérios.....	61
Tabela 4 Critérios considerados na análise para localização de áreas favoráveis para instalação de parques solar.....	63
Tabela 5 Comparação par a par para definir os pesos de cada critério segundo o método AHP	72
Tabela 6 Pesos final dos critérios em análise .....	72
Tabela 7 Fatores que justificam a grau de aptidão dos 3 grupos de áreas para instalação de parques solares .....	77

## **Capítulo I – Introdução**

### **1.1 Enquadramento do tema**

A energia elétrica é tida como um setor fundamental para o crescimento e desenvolvimento de qualquer país. A Comissão Mundial sobre o Ambiente e Desenvolvimento da Organização das Nações Unidas, no relatório conhecido como “Nosso Futuro Comum”, refere que “ *a energia é necessária para a sobrevivência diária. O desenvolvimento do futuro depende fundamentalmente da sua disponibilidade a longo prazo em quantidades crescentes de fontes que sejam confiáveis, segura e ambientalmente saudáveis*” (ONU, 1987).

A satisfação das necessidades energéticas na atualidade está fortemente ligada ao consumo de combustíveis fósseis, com a agravante das necessidades continuarem a aumentar enquanto os recursos naturais não renováveis, se esgotam a um ritmo acelerado (Monteiro, 2012). Por outro lado, a dependência e o consumo de combustíveis fósseis tem graves impactos ambientais.

Segundo Alves et al. (1999), os pequenos estados e regiões insulares, como é o caso de Cabo Verde, enfrentam problemas especiais relacionados com o fornecimento de energia, devido ao isolamento, à indisponibilidade de fontes de energias convencionais nomeadamente em reservas de combustíveis fósseis, e à reduzida dimensão do mercado energético. Não obstante isto, os autores frisam a disponibilidade substancial de recursos energéticos renováveis ainda poucos explorados nesses países.

O parque electroprodutor de Cabo Verde é sustentado maioritariamente por centrais termoelétricas alimentadas por combustíveis fósseis (PERCV, 2011). Esta situação que faz com que a economia energética do país esteja fortemente dependente dos instáveis mercados petrolíferos, ficando, deste modo, sujeita as constantes oscilações do preço dos combustíveis nos mercados internacionais (PERCV, 2011).

O problema torna-se mais grave pelo fato de muitas ilhas de Cabo Verde serem dependentes de água dessalinizada (Brito, 2012), elemento que exige um processo de tratamento com alto consumo energético.

A publicação da Lei de Bases do Sistema elétrico de Cabo Verde (Decreto-Lei nº 14/2006), revogando o Decreto-Lei nº 54/99 de 30 Agosto, que estabelece as bases do sistema elétrico de Cabo Verde, dotou o país de um quadro legal moderno e que melhor

se adapta aos novos paradigmas do setor energético mundial (ONU, 2012). Assegurar o fornecimento fiável de energia elétrica a um preço justo a todos os consumidores, bem como, um maior e melhor aproveitamento dos recursos energéticos endógenos (recursos renováveis) para a produção de eletricidade, constituem objetivos fundamentais desse Decreto-Lei.

O quadro legal sobre os sistemas energéticos renováveis, é reforçado com a publicação do Decreto-Lei nº 1/2011, de 3 de Janeiro, que estabelece as disposições relativas a promoção e incentivo à produção de energia elétrica a partir de fontes energias renováveis. A publicação desta lei visa dar um maior impulso ao setor das energias renováveis, criando um novo regime de licenciamento e exercício da atividade especificamente adaptado as energias renováveis, mas também uma serie de outras questões importantes, como o planeamento territorial e o licenciamento ambiental, ligados a exploração das energias.

O aumento da produção de eletricidade através das fontes de energias renováveis (FER), está explícito nas políticas energéticas do governo de Cabo Verde a médio e longo prazo. Uma das grandes metas do governo de Cabo Verde é de, em 2020, o país ter uma penetração de 50% de energias renováveis (ECREEE, 2012).

Assim, é fundamental que países como Cabo Verde, que assentam numa economia frágil, fortemente dependente da ajuda e do investimento externo, procurem fontes energéticas alternativas, de modo a minorar a dependência do país e reduzir os avultados custos de importação de combustíveis fósseis.

Quantificar e desenvolver metodologias e tecnologias para o aproveitamento dos recursos energéticos endógenos, é essencial para o crescimento do aproveitamento das energias renováveis no país (MECC, 2008). Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), associados a outras técnicas e ferramentas trabalho, podem ser uma mais-valia, na quantificação, modelação, ordenamento e aproveitamento dos recursos energéticos renováveis (F. J. Domínguez, 2002b; Jucá, Marques de Carvalho, & Aguiar Junior, 2006).

## **1.2 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo central avaliar o potencial energético solar da ilha de São Vicente, Cabo Verde, recorrendo aos Sistemas de Informação Geográfica. Pretende-se obter resultados em relação à quantificação do potencial energético na ilha e a sua distribuição pelo território, assim como definir e mapear as áreas mais favoráveis à instalação de sistemas energéticos renováveis provenientes do aproveitamento da energia solar.

Desta forma, com este trabalho pretende-se aplicar modelos e técnicas que quantifiquem objetivamente o potencial energético solar da ilha e a sua distribuição pelo território face às condições naturais da ilha bem como avaliar como este recurso pode ser aproveitado como uma alternativa viável às fontes de combustíveis fósseis.

Face à quantificação e distribuição do recurso é nosso objetivo definir as áreas mais favoráveis para instalação de parques de produção de energia solar, mediante uma análise multicritério, potencializando as capacidades dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Este ensaio de localização teve em conta a maximização do aproveitamento da energia solar e minimização dos impactos ambientais, bem como, o ajuste da localização a um melhor ordenamento territorial da exploração deste recurso energético renovável.

## **1.3 Estrutura da dissertação**

A dissertação está estruturada em 5 capítulos fundamentais, organizados numa sequência lógica de acordo com os objetivos pretendidos: Introdução (Capítulo 1); Fundamentação teórica (Capítulo II); Aplicação dos SIG no sector enérgico – casos de estudo (Capítulo 3); Analise multicritério para localização das áreas mais favoráveis para instalação de parques de produção de energia elétrica a partir da energia solar (capítulo 4); Conclusões e perspectivas futuras (Capítulo 5).

No primeiro capítulo fez-se um enquadramento genérico do tema, e elencam-se os objetivos pretendidos com a presente dissertação. Ainda neste capítulo, faz-se também um enquadramento geográfico da área onde se aplicou o caso de estudo (São Vicente, Cabo Verde), bem como a caracterização climática e orográfica da ilha de São Vicente.

No capítulo 2 apresenta-se um enquadramento teórico, da aplicação dos SIG nos sistemas energéticos. O capítulo inicia-se com algumas considerações gerais e conceitos sobre as energias renováveis, seguido de uma breve análise dos principais trabalhos sobre a aplicação dos SIGs nos sistemas energéticos (redes elétricas e energias renováveis).

O terceiro e o quarto capítulo, são inteiramente dedicados ao desenvolvimento do caso de estudo, o qual se organiza em duas problemáticas: i) potencial solar da ilha de São Vicente – quantidade e distribuição; ii) localização de áreas favoráveis para a sua exploração na ilha.

O capítulo 3 inicia-se com uma brevíssima caracterização da situação atual do sistema energético de Cabo Verde e da ilha de São Vicente, passando-se de seguida ao desenvolvimento do trabalho relativo a problemática de avaliar o potencial solar e a sua distribuição territorial na ilha de São Vicente.

Sabendo o potencial de energia solar disponível segue-se o capítulo 4 com trabalho relativo á segunda problemática, que reside na aplicação de uma análise multicritério no, para a localização dos melhores lugares (áreas mais favoráveis), para instalação de parques solares. A técnica de análise multicritério, foram feitas com base no método *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Foram definidos os seguintes critérios para localização de áreas favoráveis para instalação de parques de produção de energia solar: i) à disponibilidade de radiação solar na área; ii) análise da proximidade à rede transporte de energia elétrica, e à rede viária na ilha; iv) análise dos declives do terreno; análise do uso e ocupação do solo em São Vicente; v) análise da distância às principais linhas água na ilha.

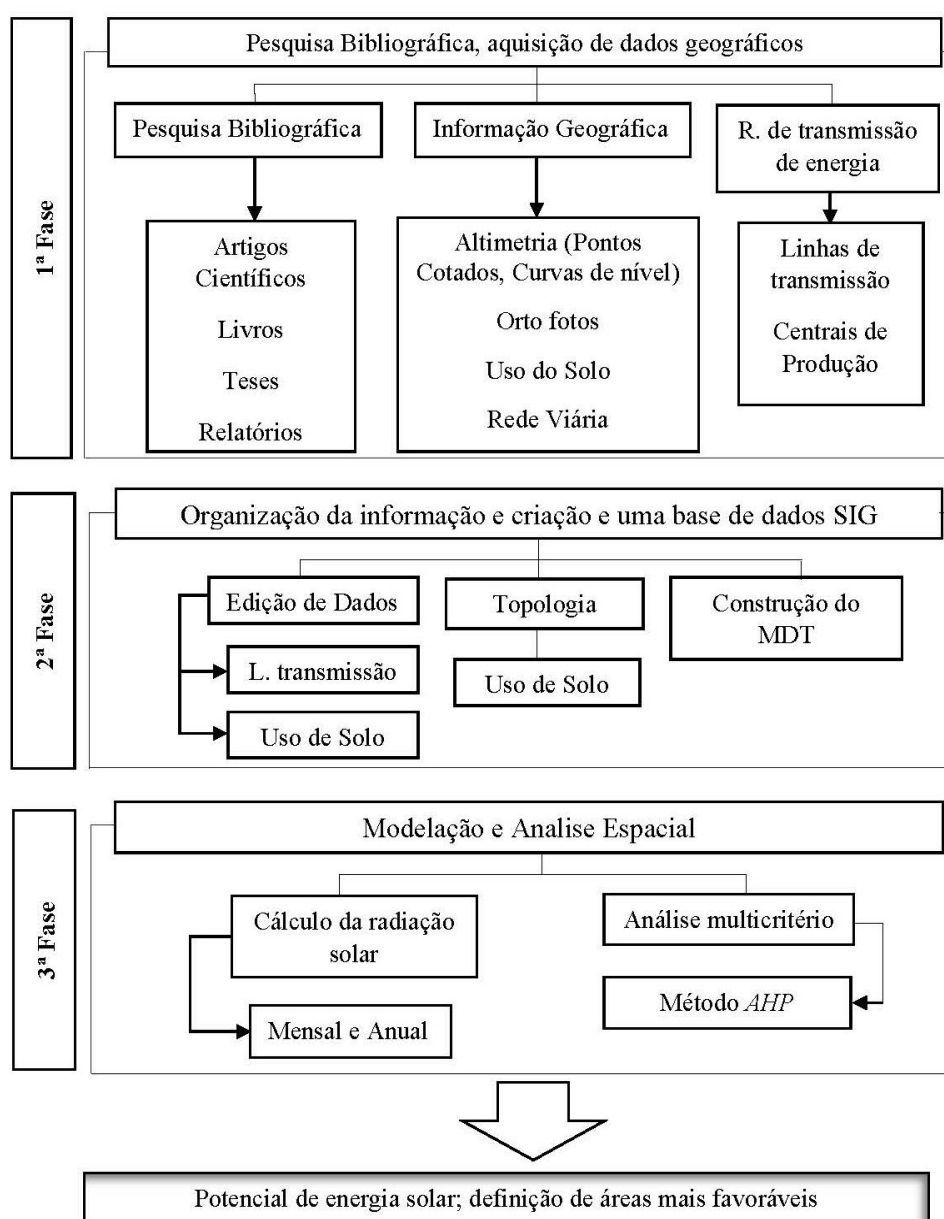
Por ultimo far-se-á neste capítulo, uma breve comparação dos resultados obtidos da análise multicritério, com as áreas propostas no Esquema Regional de Ordenamento do Território (EROT) da ilha de São Vicente (EROT, 2012), para implementar parques solares na ilha.

No último capítulo do trabalho, reservado para as conclusões, serão tecidas considerações gerais sobre os resultados obtidos, bem como, a apresentação de perspectivas futuras para a continuidade e aprofundamento desta investigação.

## 1.4 Metodologia geral seguida na dissertação

Na realização desta dissertação aplicaram-se várias técnicas e metodologias, que podem ser resumidas em 3 fases: i) em primeiro lugar uma pesquisa e reflexão bibliográfica seguida da aquisição de dados geográficos relativos a ilha de São Vicente, sobre o tema abordado neste trabalho; ii) a organização dos dados geográficos numa base de dados SIG; iii) a visualização, análise e modelação dos dados.

A Figura 1 resume de forma esquemática o fluxo de trabalho desta dissertação, bem como as diversas fases seguidas no trabalho.



*Figura 1: Esquema conceptual da organização das diversas fases de trabalho seguidas ao longo desta dissertação.*

Tal como se pode observar na Figura 1, a primeira fase é especificamente dedicada a recolha de diferentes tipos de materiais, entre as quais a bibliografia sobre a temática, a cartografia original de base da ilha de São Vicente, informações e dados relativos à rede de transporte de energia na ilha.

A pesquisa bibliográfica centrou-se na procura de livros, artigos científicos e de divulgação, legislação sobre o setor energético de Cabo Verde, relatórios, teses, sobre o tema das energias renováveis e os SIGs como ferramenta que pode auxiliar na análise, quantificação, ordenamento e exploração das fontes de energias renováveis (F. J. Domínguez, 2002a), especialmente a solar que é o caso de estudo desta dissertação.

À fase de pesquisa seguiu-se a procura de documentos e informação cartográfica de base, tanto no formato digital, como em formato analógico, da ilha de São Vicente. Foram recolhidos, a cartografia digital 1:10 000 (altimetria e planimetria) de Cabo Verde, elaborado pela empresa Municípi, SA em 2003, e cedido pelo Ministério do Ambiente, Habitação e Ordenamento do Território de Cabo Verde, ortofotomapas do ano de 2003 e 2010, e a carta topográfica 1:25 000 da ilha de São Vicente.

Esta fase foi concluída com a procura e recolha de informações sobre a rede de transporte de energia elétrica da ilha de São Vicente. Assim, foram obtidas imagens da rede através de outros trabalhos, citando o exemplo do trabalho de Garcia, (2010) e através de relatórios com informações técnicas sobre o assunto.

Seguindo o percurso metodológico ilustrado na Figura 1, passou-se para a segunda fase do trabalho, ou seja a organização dos dados bibliográficos essenciais, mais diretamente ligados ao tema de estudo e a criação de um SIG com a informação geográfica necessária. O processo de organização e tratamento dos dados geográficos e/ou cartográficos foram maioritariamente realizados no *software* ArcGis 10. Alguns dados tiveram de ser digitalizados, nomeadamente, imagens relativos à da rede transporte de energia da ilha de São Vicente. Estando todos os dados em formato digital, estes foram importados para o ArcGIS 10, no qual se realizaram operações como georreferenciação e edição (correção rede viária) e criação de temas importantes para o desenvolvimento do trabalho, nomeadamente, a carta de uso do uso da ilha de São Vicente, e o desenho das linhas que compõe a rede transporte de energia elétrica da ilha. Relativamente a cartografia digital, foram extraídas as seguintes informações: os temas da rede viária e da rede hidrográfica; as curvas níveis e os pontos cotados,



utilizados na construção do modelo digital de terreno (MDT); e algumas informações sobre a rede elétrica, como postos de transformação.

Na terceira fase do trabalho, definida no esquema (Figura 1) como a fase da modelação e análise espacial, foram realizadas uma série de procedimentos técnicos e metodológicos sistematizados, no sentido de dar resposta a alguns dos objetivos pretendidos nesta dissertação. Esta fase inicia-se com o cálculo da radiação solar, visando quantificar o potencial energético solar da ilha de São Vicente. O cálculo da radiação solar foi realizado através do modelo *Solar Analyst*, inserido na extensão *Spatial Analyst* do *ArcGis 10*. Apesar do processo ser automático, foi um pouco moroso devido a complexidade dos cálculos que o modelo envolve, demorando assim vários dias para obtenção dos resultados resultante deste processo. Os dados utilizados neste cálculo foram o MDT e a latitude da ilha de São Vicente.

Na última etapa desta fase realizou-se uma análise espacial, em ambiente SIG, dos dados em formato *raster*, em combinação com a técnica de análise multicritério. Todos os dados que se encontravam no formato vetorial (uso do solo, rede hidrográfica, rede viária, rede de transporte de energia elétrica) foram convertidos para uma grelha matricial (*raster*), de modo a ter os dados num único formato, para a realização de operações através das ferramentas matriciais.

Na análise multicritério foram definidos os seguintes critérios para localização de áreas favoráveis para instalação de parques de produção de energia solar: i) à disponibilidade de radiação solar na área; ii) análise da proximidade à rede transporte de energia elétrica, e à rede viária na ilha; iv) análise dos declives do terreno; análise do uso e ocupação do solo em São Vicente; v) análise da distância às principais linhas água na ilha. A técnica de análise multicritério, foram feitas com base no método *Analytic Hierarchy Process* (AHP).

Cada uma das metodologias e técnicas referidas, serão descritas de forma mais exaustiva no capítulo 3 e 4 deste trabalho.

## **1.5 Enquadramento Geográfico**

O arquipélago de Cabo Verde situa-se no oceano Atlântico, a aproximadamente 500 km da costa ocidental Africana, entre os paralelos de 14°48'00" e 17°12'13" de latitude Norte e os meridianos 22°23'59" e 25°20'40" de longitude Oeste (Figura 2).

De acordo com Gomes & Pina, (2003) , as ilhas de Cabo Verde elevam-se de um soco submarino, em forma de ferradura, situado a uma profundidade média de cerca de 3000 metros, de onde emergem três pedestais bem distintos: a norte, onde se localizam as ilhas de Santo Antão, São Vicente, Santa Luzia e São Nicolau e os ilhéus Boi, Pássaros, Raso e Branco. A Leste e a Sul, localizam-se as ilhas do Sal, Boa Vista, Maio e Santiago e, os ilhéus Rabo de Junco, Curral de Dadó, Fragata, Chano, Baluarte e de Santa Maria. A oeste compreende as ilhas do Fogo, Brava e, os ilhéus Grande, Luís Carneiro e de Cima.

As ilhas, normalmente são distinguidas por dois grupos em função da sua posição geográfica em relação aos ventos alísios: i) o grupo de Barlavento (lado onde sopra o vento) que integra as ilhas de Santo Antão, São Vicente, Santa Luzia, São Nicolau, Sal e Boa Vista; ii) grupo de Sotavento (lado oposto ao qual sopra o vento), constituído pelas ilhas de Santiago, Maio, Fogo e Brava. O arquipélago totaliza uma área de 4033 km<sup>2</sup> de superfície e uma zona económica exclusiva de aproximadamente 734, 236 km<sup>2</sup> (Bravo de Laguna, 1985).

Climaticamente o arquipélago integra a ampla faixa de climas áridos e semiáridos, da região Saheliana<sup>2</sup>, entre as altas pressões subtropicais e baixas pressões equatoriais da frente intertropical. Cabo Verde, integra a região biogeográfica da macaronésia juntamente com os arquipélagos da Madeira e Açores (R. Rocha, 2010) .

Estando incluído na região climática Saheliano, pode-se distinguir duas estações climáticas:

- i) A estação seca entre os meses de Novembro a Junho, na qual predominam os ventos do norte e nordeste, e que normalmente não provocam precipitações (Amaral, 2007). Porém ocasionalmente sopram massas de ar quente e seco do deserto, originando o harmatão – vento seco e poeirento que sopra na direção nordeste a este proveniente do Sahara.

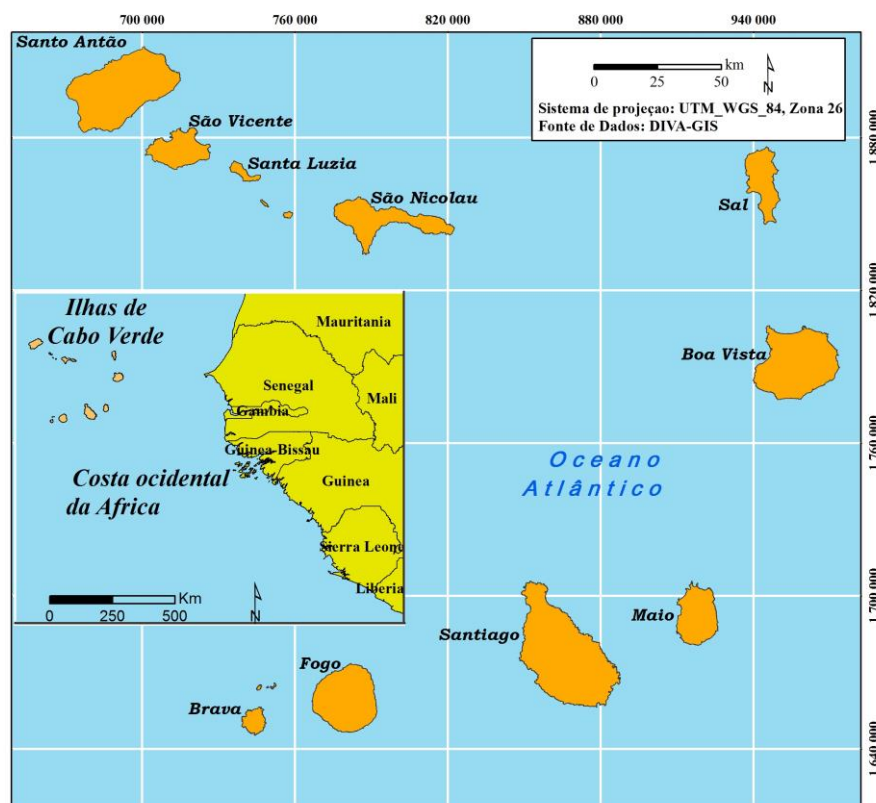
---

<sup>2</sup> De acordo com a classificação climática de koppen. Url: <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/koeppen.htm>

- ii) A estação húmida, mais curta entre Julho e Outubro, onde ocorre intermitentemente alguma precipitação (Amaral, 2007).

Cabo Verde compartilha estas características climáticas com as regiões continentais próximas, onde normalmente as chuvas ocorrem nos meses mais quentes do ano e são muitas vezes de caráter torrencial. Para além disso, existem outros fatores que influenciam o clima do arquipélago:

- i) A corrente oceânica – do norte do arquipélago provém a corrente fria das Canárias que desloca em direção a sul paralela à costa Africana, contribuindo para refrescar e aumentar a humidade as massas de ar que atingem as ilhas de Cabo Verde (EROT, 2012);
- ii) A localização oceânica – o carácter moderador do oceano é responsável pela estabilidade das temperaturas e pelas baixas amplitudes térmicas;
- iii) O relevo é o fator responsável na diferenciação dos andares bioclimáticos (R. Rocha, 2010 ), sendo que as ilhas mais planas são as mais áridas ou semiáridas, enquanto as ilhas mais montanhosas são as mais húmidas;
- iv) A proximidade ao continente contribui para a diferenciação climática local, dado a maior ou menor intensidade que as massas de ar seco e frio chegam às diferentes ilhas.



*Figura 2: Enquadramento geográfico do arquipélago de Cabo Verde*

### **1.5.1 Localização geográfica de São Vicente no arquipélago de Cabo Verde**

A ilha de São Vicente localiza-se a nordeste do arquipélago de Cabo Verde, entre os paralelos 16° 46' e 16° 55' de latitude Norte e os meridianos de 24° 51' e 25° 05' de longitude a Oeste de Greenwich (Figura 3). A ilha cobre uma superfície de 227 Km<sup>2</sup>, representando 5, 6% do total da superfície do arquipélago habitado (Cruz, 2007).

São Vicente integra o grupo das ilhas do Barlavento. O canal de São Vicente separa-a da vizinha ilha de Santo Antão<sup>3</sup>. É considerada uma ilha com vastas áreas aplanadas, com vários maciços montanhosos, sendo Monte Verde o ponto mais alto da ilha com cerca de 750 metros de altitude (Cruz, 2007).



*Figura 3: Enquadramento geográfico da ilha de São Vicente no arquipélago de Cabo Verde*

### **1.5.2 Caracterização orográfica da ilha de S. Vicente**

A ilha de São Vicente apresenta duas grandes áreas morfologicamente distintas: i) a primeira localizada a uma cota entre 100 e 150 metros de altitude, planas ou com pequenas colinas, ocupando a parte central da ilha e a norte, cobertas por vezes, por areias eólicas; ii) a outra área, mais extensa, rodeada pela anterior e formada por um alinhamento de montanhas com cotas de altitude que oscilam entre 500 e 750 metros.

<sup>3</sup> Extraído de Url: [www.sit.gov.cv](http://www.sit.gov.cv)

Este alinhamento é cortado por três vales que estabelece a comunicação entre o interior e o mar: i) a norte, a Ribeira de Viana, aberta na Baía do Mindelo, ii) a sudoeste, a ribeira de São Pedro, formando a baía com o mesmo nome; iii) a este-sudeste a ribeira do Calhau (EROT, 2012).

No interior da ilha, coberto parcialmente por depósitos sedimentares recentes, afloram rochas intrusivas e extrusivas, vulcânicas submarinas sem diques, e ultra-alcalinas mais recentes, estendidas pelo setor este-nordeste.

Como grandes unidades geomorfológicas da ilha, distinguem-se entre formas construtivas ou estruturais, e formas de modelado.

Segundo o relatório do EROT (2012), nas unidades geomorfológicas mais acidentadas ou derivadas do vulcanismo encontram-se:

- i) Maciços residuais (Figura 4), dentro das quais se destaca o maciço montanhoso do Monte Verde, com cerca de 750 metros de altitude, e é o ponto mais alto da ilha. Na parte noroeste são mais representativas as formações de Monte Cara e Garrachica. Já na parte central e a norte, ambos maciços, surgem formações montanhosas em formas de cristas que descem até ao mar. Entre cristas dos interflúvios formam-se vales em U, terminando em pequenas baías.



*Figura 4: Maciço Residual (EROT, 2012)*

- ii) Cones vulcânicos – devido a sua origem vulcânica encontram-se na ilha de São Vicente, alguns cones vulcânicos, em consequência do vulcanismo mais recente. O maior número de edifícios vulcânicos situa-se a este da ilha (EROT, 2012). A título de exemplo a sudeste da ilha encontra-se o Pico do Vento, com 435 metros de altura (Figura 5), Cratera do Curral João Paula, ou Cratera do Vulcão de Viana com 158 m.



*Figura 5: Cone vulcânico do Pico do Vento (EROT, 2012)*

- iii) Carsos, constituído por rochas lávicas que se encontra em volta dos cones vulcânicos, resultante do rápido arrefecimento do magma em contacto com uma massa de água (EROT, 2012) .
- iv) Depressão central, que topograficamente corresponde a área mais baixa da ilha. Esta planície situa-se entre os maciços do Monte Verde na zona oriental e Monte Cara a noroeste;

Em relação às formas de modelado pode-se encontrar-se na ilha de São Vicente as seguintes:

- i) Interflúvios em rampa na formação do Monte Verde, e a sul da ilha, coincidente com os principais leitos amplos de barranco, caso do Monte de Pedro ou Monte da Ribeira do Meio;
- ii) Relevos em crista, existentes a sudoeste da ilha. Denomina-se de relevo em crista pelo fato dos seus cumes funcionarem como uma divisória de águas (EROT, 2012);
- iii) Barrancos de leito encaixado e leito amplo – uma das formas de relevo mais encontradas nas ilhas montanhosas e normalmente distingue-se em encaixado ou de leito amplo, de acordo com morfologia do seu leito (EROT, 2012). O barranco de leito encaixado encontra-se, nas áreas de maior altitude. Por exemplo na formação do Monte Verde, encontram-se as Ribeira de Baleia, do Feijoal Preto ou da Aldeia. Por outro lado, os barrancos de leito amplo (Figura 6) encontram-se nas áreas mais baixas. Pode-se citar como exemplo a Ribeira da Calheta Grande, a Ribeira do Monte Preto, a do Meio e a de Palha de Carga.





*Figura 6: Leito de barranco amplo (EROT, 2012)*

Iv) Dunas e praias – dunas costeiras sem vegetação, que alimentadas por areais das praias, movem-se para as áreas costeiras, recobrindo ou transgredindo terrenos mais antigos (Gardner, 1955). A forte influência dos ventos alísios, ao longo do ano e até mesmo durante o dia, em direção ao nordeste e sudoeste fazem com que essas acumulações arenosas se localizem nas zonas do litoral e nas áreas abertas a noroeste (Figura 7).



*Figura 7: Dunas rampantes (EROT, 2012)*

No tocante às praias, formações geomórficas dinâmicas podem ser produzidas por ação das ondas do mar em interação com a circulação eólica dominante, distinguem-se 3 tipos na ilha de São Vicente: praias de areia preta, praias de areia branca e praias mistas. As praias de areia branca localizam-se a noroeste da ilha, que coincide com a entrada dos ventos alísios, sendo as principais, as praias do Norte e a da Celada do Calhau.

As praias de areia preta localizam-se no sul da ilha, pelo fato de serem formados por sedimentos transportados pelos barrancos, sendo as principais as praias de Palha Carga e da Calheta grande.

As praias mistas, são praias que combinam areia branca, negra e seixos rolados de diferentes tamanhos, e são as mais predominantes na ilha. É o exemplo das praias do Flamengo, São Pedro, Galé, na baía do Mindelo (EROT, 2012).

### **1.5.3 Caracterização climática da ilha de S. Vicente**

São Vicente apresenta um clima quente, com uma temperatura média anual de 24 °C (Dinis, 1994). É uma das ilhas mais áridas do arquipélago. Os ventos dominantes na ilha são do nordeste, atingindo velocidades médias na ordem dos 19,8 Km/h. Entre Dezembro a Março a ilha encontra-se sobre a influência do harmatão, vento quente e seco do Leste, que além de provocar o fenómeno vulgarmente conhecido como “bruma seca”, reduz a humidade e aumenta a evapotranspiração (Amaral, 2007; EROT, 2012; A. Rocha, Costa, & Sanches, 2011).

É rara a ocorrência de precipitações, mesmo nos meses mais húmidos (Agosto, Setembro e Outubro). A sua orografia não permite que a ilha beneficie das chuvas orográficas que normalmente ocorrem nas ilhas vizinhas, nomeadamente São Nicolau e Santo Antão.

De acordo com o relatório de caracterização e diagnóstico ambiental do Esquema Regional de Ordenamento do Território da ilha de São Vicente (EROT, 2012), as massas de ar predominantes e que caracterizam o clima da ilha são:

- i) Os ventos alísios do nordeste, que são ventos frescos e secos que circulam na direção NE-SW, e que influenciam todas as ilhas do barlavento, do qual São Vicente faz parte;
- ii) A monção do Atlântico Sul, que é um vento húmido e quente que provém do sudoeste, e responsável pelas fortes chuvas que ocorrem em Cabo Verde, habitualmente entre Julho e Outubro. Esta é uma zona de convergência entre os alísios e a monção sobre os oceanos ou entre a monção e o harmatão sobre o continente. Este fenómeno normalmente está associado a chuvas torrenciais, durante poucos dias e por vezes, apenas por algumas horas;
- iii) Harmatão que é uma massa de ar quente e seco proveniente do deserto do Sahara, frequentemente nos meses de Janeiro a Abril, embora com pouca duração.

A Figura 8 representa a velocidade média anual do vento na ilha de São Vicente entre os anos de 2000 a 2012, calculado no âmbito desta dissertação, a partir de dados provenientes da estação anemométrica do Mindelo.



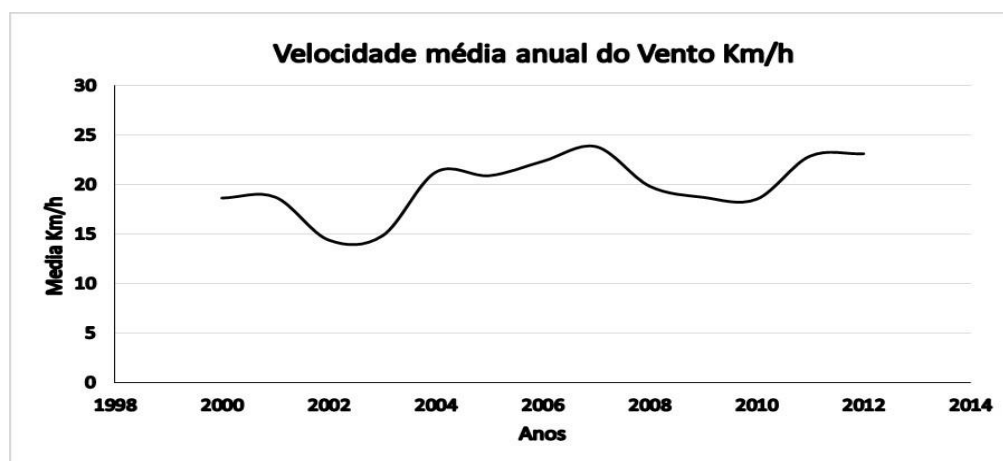


Figura 8: Velocidade média anual do vento na ilha de São Vicente entre os anos de 2000 a 2012

Fonte de Dados: INMG

Analisando o gráfico constata-se que a média da velocidade do vento, nesse horizonte temporal não sofreu grandes oscilações, mantendo a velocidade média anual, em torno dos 19,8 km/h por ano.

Segundo Rocha et al., (2011) a ilha de São Vicente apresenta uma temperatura média anual das mais baixas de Cabo Verde, juntamente com a ilha do Sal (Figura 9). Os autores referem que o valor médio da temperatura, que até ao ano 2000 situava abaixo dos 24° C, vem aumentando frequentemente para valores acima dos habituais 24°C.

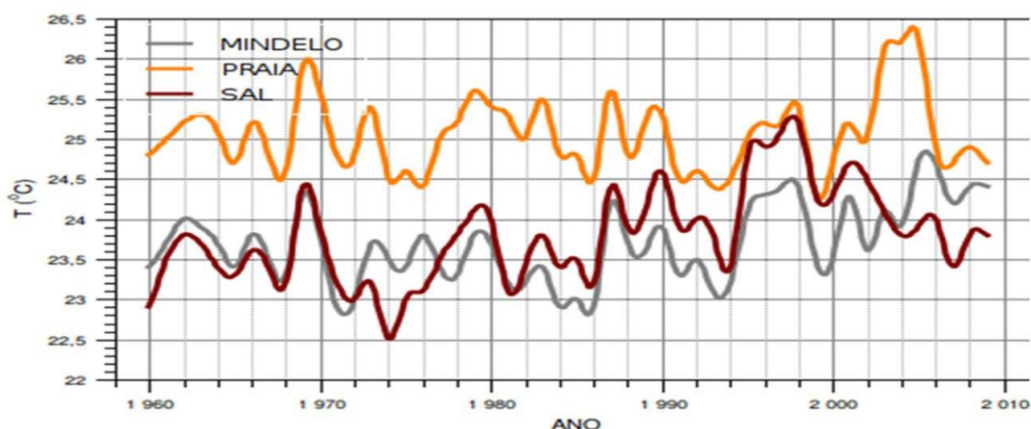


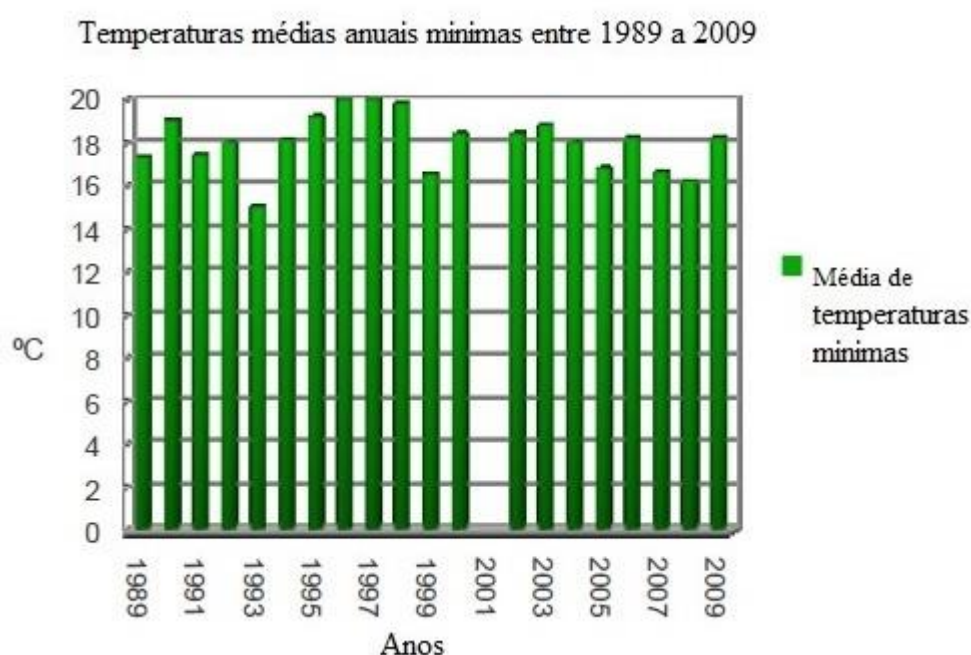
Figura 9: Variação média anual da temperatura entre 1960 a 2010 nas cidades do Mindelo, Praia e a ilha do Sal (A. Rocha et al., 2011)

Note-se no gráfico (Figura 9), que de 1960 até por volta do ano de 1995 a temperatura média anual da cidade do Mindelo na ilha de São Vicente, se situava abaixo do 24° C. A partir daí, a temperatura tem aumentado para valores médios entre 24,5 a 25° C.

A temperatura mínima da ilha de São Vicente, é em média, 18,2°C, sendo normalmente Janeiro o mês mais frio e Setembro o mês mais quente (EROT, 2012).

Na Figura 10 que representa a evolução das temperaturas mínimas na ilha entre 1989 a 2009. Note-se que não existe grande oscilação das temperaturas mínimas anuais. Os dados utilizados nessa análise foram provenientes da estação anemométrica do Mindelo.

A temperatura mínima da ilha de São Vicente, é em média, 18,2°C, sendo normalmente Janeiro o mês mais frio e Setembro o mês mais quente (EROT, 2012).



*Figura 10: Temperaturas médias mínimas entre 1989 a 2009 da ilha de São Vicente. Dados da estação anemométrica do Mindelo (EROT, 2012)*

As precipitações na ilha, são escassas, fenómeno característico de quase todo o arquipélago de Cabo Verde. As chuvas concentram-se mais nos meses de Agosto e Setembro, ou seja no verão, e habitualmente tem carácter torrencial. As chuvas na ilha são insuficientes para resolver o défice de água na ilha, e por isso mesmo a ilha é dependente de água dessalinizada (EROT, 2012).

## **Capítulo II. Fundamentação teórica**

### **2.1 Conceito e considerações gerais sobre energias renováveis**

Energia renovável é todo o tipo de energia produzida por uma fonte natural e que não diminui pelo fato da sua utilização (LEADER II, 1999).

A CECAL (2002) define fontes de energias renováveis (FER) como: *todas as fontes energéticas que produzem de forma continua e que são transformados pelo homem em energia útil para satisfazer as suas necessidades<sup>4</sup>*. Segundo CECAL (2002), a maioria (FER) tem origem solar, já que este produz uma serie de fenómenos naturais, que gerem os recursos, que são aproveitados para os diferentes tipos de energia renovável (vento, água, altas temperaturas no interior da terra, biomassa).

A exploração e utilização das energias renováveis como alternativa aos combustíveis fósseis é uma preocupação global, dadas as suas enormes vantagens ambientais e socioeconómicas.

A União Europeia através da DIRECTIVA 2001/77/CE, foca a necessidade de promover a produção da eletricidade a partir de FER, nos estados membros. No art. nº 2 da citada Diretiva está explícito que a promoção da eletricidade produzida a partir de energias renováveis é fundamental, por razões de segurança, de diversificação do abastecimento de energia, de proteção ambiental, e de coesão económica e social, nos estados membros.

Em relação ao continente Africano, apesar de existir um potencial substancial de fontes de energias renováveis, estas são ainda pouco exploradas.

O sector energético do continente Africano, compreende-se melhor dividindo-o em três regiões distintas: i) norte de África, fortemente dependente do petróleo e gás; ii) África do Sul que depende do carvão; iii) Africa subsaariana, fortemente dependente da biomassa (S Karekezi, 2002).

De acordo com S. Karekezi & Kithyoma (2003), a região Africana dispõe de 1,1 Gigawatts de capacidade hidroelétrica, 9000 Megawatts em potencial geotérmica, e abundantes recursos em biomassa, solar e elevado potencial eólico. Porém, a exploração desse potencial energético renovável é ainda muito insignificante, devido ao baixo

---

<sup>4</sup> Tradução própria

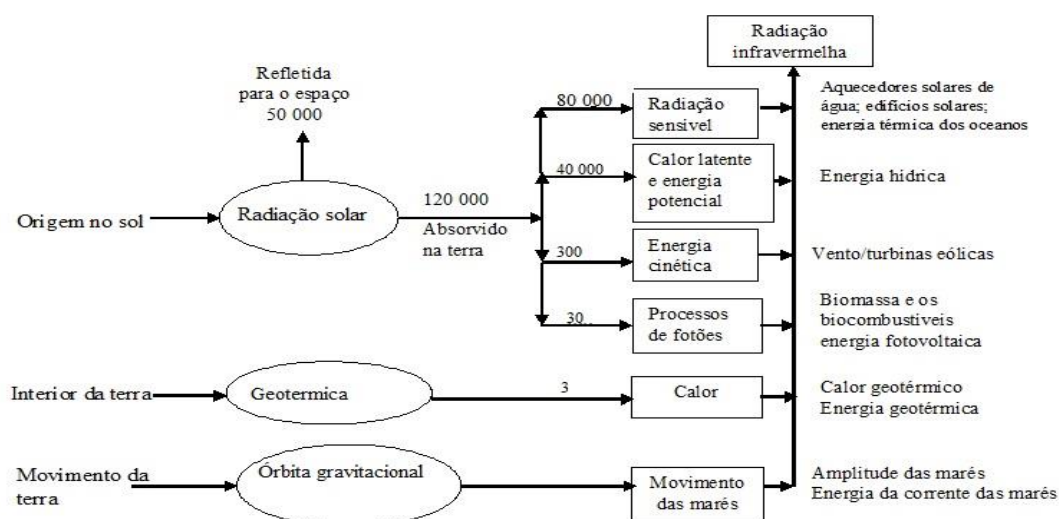
interesse político, ao baixo nível de investimento, bem como um conjunto de fatores técnicos.

Na região da costa ocidental Africana, Cabo Verde, têm-se destacado como o país que mais tem apostado no setor das energias renováveis, com enfoque na energia eólica e solar (ECREEE, 2012).

Atualmente Cabo Verde possui um parque eólico, com uma potência instalada de 25,5 Megawatts (MW), aumentando para 33 MW do total de energias renováveis no arquipélago, a que correspondente a 25% de penetração de energias renováveis no país (ECREEE, 2012). Com isto, Cabo Verde alcançou a meta definida nas políticas energéticas do governo de, em 2011, ter 25% de penetração de energias renováveis e metade, da estabelecida para 2020, que é ter as necessidades energéticas do país asseguradas em 50% de energias renováveis.

### 2.1.2 Principais fontes de energias renováveis

Partindo das definições anteriores, note-se que existe um conjunto de fontes de energias renováveis. Segundo Twidell & Weir, (2006) existem 3 fontes de energias renováveis primárias: i) o sol; ii) A energia resultante do calor do interior da terra, ou seja energia geotérmica iii) a energia resultante do movimento gravitacional do sol, da lua e da terra. A partir destas três fontes primárias de energia, derivam várias outras FER (Figura 11), que podem ser exploradas e transformados em energia elétrica.



*Figura 11 Fontes de energias naturais correntes na terra, e as FER que delas derivam. Adaptado de (Twidell & Weir, 2006)*

Na Figura 11, pode-se ver que existem diversas FER, sendo que a maior parte delas tem origem no sol.

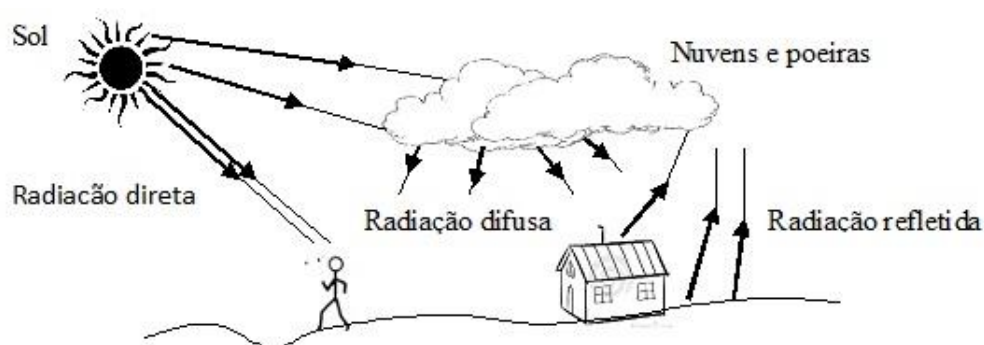
A presente dissertação abordará apenas a energia solar como caso de estudo.

### **2.1.2.1 Energia Solar**

O sol é uma fonte energia limpa. Esta pode ser captada a partir da radiação solar e transformada em energia elétrica.

A radiação solar incidente sobre uma superfície, dentro da atmosfera terrestre apresenta três componentes (Figura 12) de acordo com Lebeña & Costa, (1996):

- i) Radiação direta – a radiação proveniente diretamente do sol;
- ii) Radiação difusa – a radiação proveniente de todo o céu, exceto do disco solar. A radiação solar ao atravessar atmosfera, parte dela é refletida pelos componentes atmosféricos (nuvens), outra parte é absorvida por gases como Ozono ( $O_3$ ), Oxigénio ( $O_2$ ), vapor de água ( $H_2O$ ) entre outros, e a restante é difundida;
- iii) Radiação refletida – radiação proveniente da reflexão do sol em contato com a superfície (chão), e com objetos circundantes. A refletividade do chão é designada por albedo e depende da composição e cor da superfície.



*Figura 12: Componentes e comportamento da radiação solar na atmosfera terrestre. Adaptado de (Twidell & Weir, 2006)*

Os recursos ligados a energia solar têm uma grande variabilidade espacial, pelo que podem ser encontrados em quase todos os lugares. Porém, a insolação incidente num determinado lugar, depende de um conjunto de fatores. Segundo Dominguez (2002a), dois tipos de fatores que influenciam a incidência da radiação solar na superfície terrestre: i) as condições geográficas e a componente temporal (latitude,

orientação e hora); ii) as condições meteorológicas e climatológicas que determinam a radiação diária recebida e a sua variabilidade estacional.

Atualmente têm-se desenvolvido modernas tecnologias de aproveitamento da energia solar, tanto na forma de calor (conversão térmica), como em eletricidade (conversão fotovoltaica), através de sistemas de captação ou coletores (F. J. Domínguez, 2002a).

A produção de energia elétrica a partir da energia solar, é realizada através de uma célula solar fotovoltaica, que habitualmente é um disco de silício monocristalino (F. J. Domínguez, 2002b; N. M. P. Gomes, 2011). As células são colocadas com ligações em série e/ou em paralelo, interligadas para a obtenção da tensão e corrente desejada (Demonti, 2003).

A análise do potencial solar pode ser feita a escala global ou local, através de vários métodos em função da escala de trabalho (N. M. P. Gomes, 2011).

Segundo Wittmann, et al., (1997) o potencial de energia solar de um determinado lugar depende dos seguintes fatores: i) realidade local; ii) dados meteorológicos disponíveis; iii) a eficiência das tecnologias utilizadas na conversão da energia solar em fotovoltaica; e iv) fatores económicos.

Izquierdo, et al., (2008), frisam três aspetos que devem ser considerados na análise do potencial solar de uma região ou lugar: i) análise do potencial físico, ou seja estudo da incidência da radiação solar sobre a área em análise; ii) análise do potencial geográfico, relativamente a irradiação solar na superfície do solo ou cobertura; iii) análise do potencial técnico, correspondente a eficiência dos painéis fotovoltaicos (PV).

É neste sentido que os SIG podem desempenhar um papel importante no mapeamento desses recursos, bem como na definição dos melhores sítios para a localização de parques solares.

A utilização da energia solar fotovoltaica tem enormes vantagens em relação as energias produzidas através de fontes não-renováveis (Tabela 1).

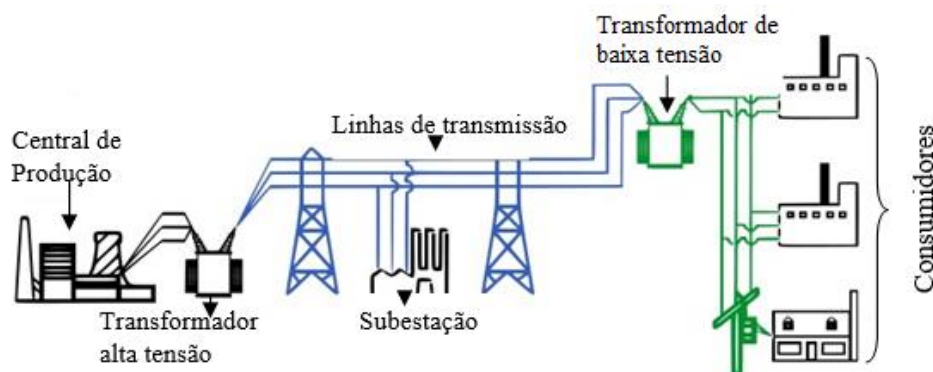
*Tabela 1 Vantagens e desvantagens da produção de energia solar. Adaptado de: (Mateus & Costa, 2004)*

Vantagens
<ul style="list-style-type: none"><li>• Ausência de emissão de qualquer tipo de gás poluente</li><li>• Longevidade, 20 a 30 anos de vida para a maioria dos componentes;</li><li>• Se tiverem instalado baterias podem fornecer energia mesmo na ausência de radiação solar;</li><li>• Funcionamento silencioso</li><li>• Grande variabilidade espacial, ou seja disponível em quase todos os sítios onde haja luz solar;</li><li>• Equipamentos pouco pesados e facilmente transportáveis;</li><li>• Facilmente expansíveis</li></ul>
Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"><li>• Elevado custo de instalação;</li><li>• Variação da quantidade produzida de acordo com as mudanças climáticas.</li></ul>

## 2.2 Aplicações de SIG em Sistemas energéticos

### 2.2.1 Aplicações de SIG Redes Elétricas

As infraestruturas de redes elétricas são constituídas, por um conjunto de informação espacial e não espacial (centrais de produção, subestações, redes de transmissão, postos de transformação, transformadores, polos de produção, consumidores), conectadas, formando um sistema complexo, como se pode observar na Figura 13.



*Figura 13: Elementos que constituem uma rede de distribuição elétrica*

O conhecimento da rede nos mínimos detalhes é crucial para o bom funcionamento dos serviços (Davis, 1998). Assim, torna-se necessário ter um cadastro fiável de todos os elementos, que mostre a representatividade espacial da rede, pois as alterações na mesma são frequentes (Ferreira & Santos, 2010).

Os SIGs, dado a sua capacidade de integrar diversos tipos informação geográfica e alfanumérica, têm um papel importante no mapeamento de todas as entidades que compõem a rede. Para Kaushik & Vinayagam (Sd), o papel dos SIG é de mapear todas as entidades em tempo real, e compartilhá-los com todos os sectores da empresa de distribuição.

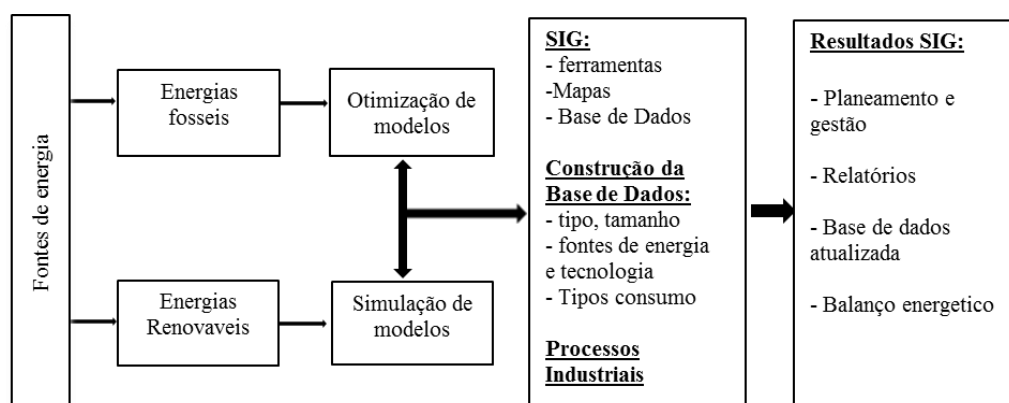
Para os mesmos autores existem falhas frequentes na rede derivadas de fatores como: desastres naturais (excessiva precipitação, relâmpagos, quedas de árvores), sobrecarga na rede, ou mesmo roturas nos equipamentos devido a falta de manutenção. Uma vez que a utilização dos SIG, permite localizar de forma fácil e rápida onde ocorreu um determinado problema na rede, é relativamente simples comunicar rapidamente aos técnicos de terreno, o local e a extensão da rede afetada, para ser reparado (Kaushik & Vinayagam, Sd).

Os SIG são dos sistemas de informação mais utilizados nas empresas de produção e distribuição de energia elétrica (Kale & Lad, 2006), pois, as tecnologias de informação geográfica (TIG), possibilitam um incremento da produtividade nos projetos de construção, operação, localização de unidades consumidores, e manutenção na rede de distribuição (Ferreira & Santos, 2010).

Hassan & Akhtar (2012), referem que a construção de uma base de dados SIG, desempenha um papel vital na operação e planeamento da rede. Para esses autores uma vez que a base de dados é atualizada, estes podem ser utilizados, para análise e modelação das redes de distribuição de energia.

Na Figura 14 é apresentado um esquema conceptual de uma base de dados SIG de uma rede elétrica aplicado a um caso de estudo em Karachi, Paquistão, proposto por (Nawaz-ul-Huda et al., 2012).





*Figura 14: Esquema conceptual de uma base de dados SIG aplicado no sistema energético. Adaptado de: (Nawaz-ul-Huda, Burke, Azam, & Naz, 2012)*

Face às inúmeras vantagens da aplicação dos SIG na gestão das redes de distribuição de energia elétricas vários estudos e projetos, têm vindo a ser desenvolvidos para integração e aplicação dos SIG, nas empresas de produção e distribuição de energia elétrica em vários países.

Entre 1994 e 1996 foi desenvolvido o projeto SolarGIS. Este projeto foi financiado pela união Europeia e desenvolvido por um consórcio entre centros de investigação europeus, coordenado pela ARMINES, com o intuito de mostrar as potencialidades dos SIG nas energias renováveis e na eletrificação rural descentralizada (B. J. Domínguez, Pinedo, & Augusto, 2008). Mais adiante far-se-á uma análise mais exaustiva desse projeto.

Em 2001, um consórcio entre a *Environmental Systems Research Institute* (ESRI) e a empresa Miner & Miner, desenharam um SIG, chamado *ARCGIS Electric Distribution*. Este SIG, foi projetado para empresas de eletricidade que gerem sistemas de distribuição de energia elétrica.

O projeto corresponde a uma plataforma construída mediante a tecnologia orientada à Objeto que fornece uma vista geograficamente orientada para dispositivos de distribuição de eletricidade (estruturas, circuitos, e até mesmo dos clientes), auxiliando os gestores e administradores de serviços públicos, na visualização, análise e compreensão das engenharias que envolve o sistema elétrico, os problemas, e o mais

importante, ajuda na tomada de decisões para resolução dos problemas<sup>5</sup> (ESRI & Miner and Miner, 2001).

De acordo com ESRI & Miner and Miner (2001), o principal objetivo do sistema é proporcionar maior eficiência operacional e benefícios comerciais que transcende os limites tradicionais do mapeamento em SIG.

Em Portugal em finais de 2002 a Rede Elétrica Nacional (REN), desenvolveu uma ferramenta de gestão de informação baseada em dois sistemas: *GesServe* e o *GeoServ*. Os sistemas permitem otimizar a relação entre os milhares de proprietários de terrenos que são atravessados pelos 6437 Km de linhas de transmissão que integram a rede nacional de transporte de energia elétrica. O processo compreende duas fases: a primeira onde são identificadas, cadastradas e indemnizadas cada uma das parcelas, e posteriormente a fase da exploração onde é necessário serem devidamente vigiadas, de modo a assegurar as condições de segurança exigidas pela sua exploração (REN, 2004).

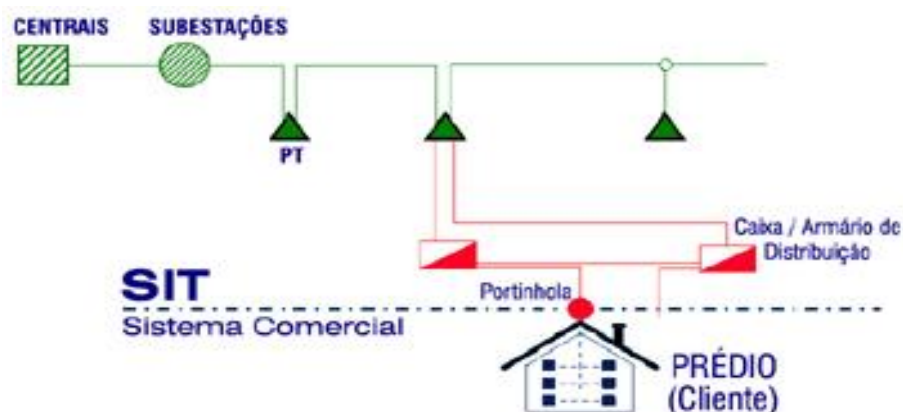
Assim, no *GeoServ* é possível visualizar o cadastro das linhas e relacionar os prédios e parcelas com os dados alfanuméricos existentes no *GesServ*. Esta ligação é efetuada através de um identificador único existente para cada prédio e parcela de uma determinada linha.

Na ilha da Madeira, a Empresa de Eletricidade da Madeira (EEM), tem desenvolvido uma plataforma SIG, que integra toda a informação técnica da rede elétrica, para efeitos de cadastro, planeamento, exploração e apoio ao cliente.

Segundo a EEM (2005), pretende-se com o projeto, constituir um registo georreferenciado e atualizado de todas as infraestruturas elétricas, desde, centrais de produção, subestações, postos de transformação, linhas aéreas e subterrâneas de alta, média e baixa tensão, armários de distribuição, caixas de visita e clientes (Figura 15).

---

<sup>5</sup> Tradução própria



*Figura 15: SIG da rede elétrica da ilha da Madeira (EEM, 2005)*

No continente Africano, alguns estudos têm sido realizados para integração dos SIG na gestão das redes elétricas. A título de exemplo citamos um SIG desenvolvido em Abuja, Nigéria para a gestão da rede elétrica proposto por Salawudeen & Rashidat (2006). Os autores referem que “*Não há dúvidas, a tecnologia da geoinformação veio para ficar e tem ajudado na área de mapeamento das entidades e especialmente na distribuição da energia elétrica. Para uma distribuição eficaz da eletricidade é necessário aplicar a tecnologia da geoinformação em todo o país*”(Salawudeen & Rashidat, 2006).

Kaijuka (2006), fez uma análise da utilização dos SIG no planeamento da eletrificação rural na Uganda. O trabalho teve como objetivo central reduzir as desigualdades no acesso a eletricidade. Esse objetivo poderia ser conseguido, segundo Kaijuka (2006) utilizando o SIG, na identificação das áreas com necessidades energéticas, e projetar a potência necessária para ser instaladas nessas áreas.

Da análise bibliográfica feita pode-se concluir que tem havido uma aposta na integração do SIG, por parte das empresas de produção e distribuição de eletricidade, como uma ferramenta capaz de integrar tanto informação espacial como não espacial, no planeamento e gestão da redes de distribuição de energia.

Os estudos e projetos referidos anteriormente, são apenas alguns exemplos dos vários trabalhos realizados nesta abordagem. Pois não é objetivo, e nem seria possível elencar neste trabalho todos os trabalhos em torno dessa temática.

## **2.2.2 Aplicação de SIG em Energias Renováveis**

### **2.2.2.1 Considerações gerais**

As FER são caracterizadas pela forte variabilidade temporal e espacial, em contraste com a distribuição espacial dos chamados combustíveis fósseis. Esta variabilidade espacial faz com que em qualquer lugar do planeta se encontra pelo menos uma fonte energia autóctone (B. J. Domínguez et al., 2008).

A variabilidade e complexidade do sistema de fornecimento e demanda das FER, faz com que ferramentas como os SIG sejam bastante adequadas para a sua avaliação (Dominguez, Pinedo, & Gonzalez, 2008).

De acordo com (J.G Amador, 2000), o uso dos SIG como ferramenta de suporte na integração regional das energias renováveis na atualidade é quase imprescindível. Porém, o autor alerta sobre os erros que possam surgir, muitas vezes resultante da má qualidade ou erros na introdução dos dados, entre outros que possam comprometer a fiabilidade dos resultados.

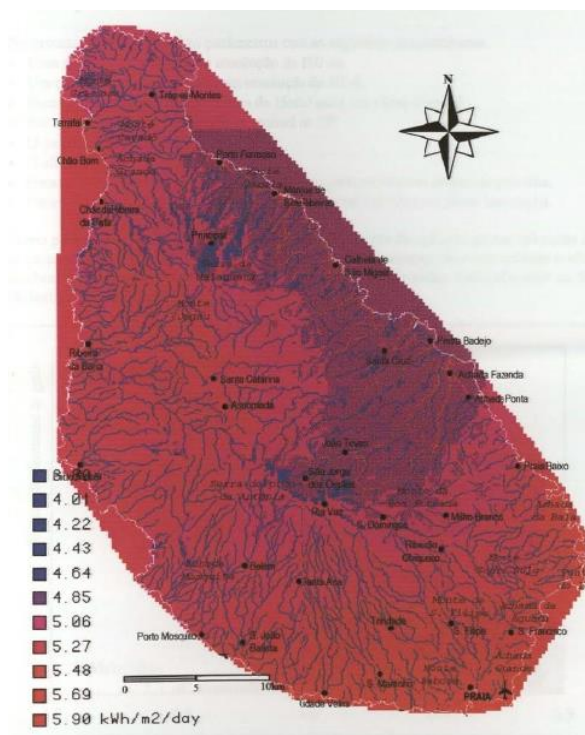
### **2.2.2.2 Aplicações em energia eólica e solar**

Como já foi referido anteriormente, um dos primeiros projetos da aplicação dos SIG nas energias renováveis, como principal ferramenta de análise foi a SOLARGIS, (J. G Amador & Domínguez, 2005). Inicialmente, o principal objetivo do projeto SOLARGIS era demonstrar a importância da integração dos SIG nas energias renováveis, como ferramenta de suporte a produção descentralizada de eletricidade, numa série de áreas piloto, bem como recolher dados geográficos e desenvolver ferramentas para determinar o potencial energético solar de uma área (SOLARGIS TEAM, 1994) citado por F. J. Domínguez, (2002b). O projeto foi testado em algumas áreas pilotos, inclusive em Cabo Verde, mais precisamente na ilha de Santiago.

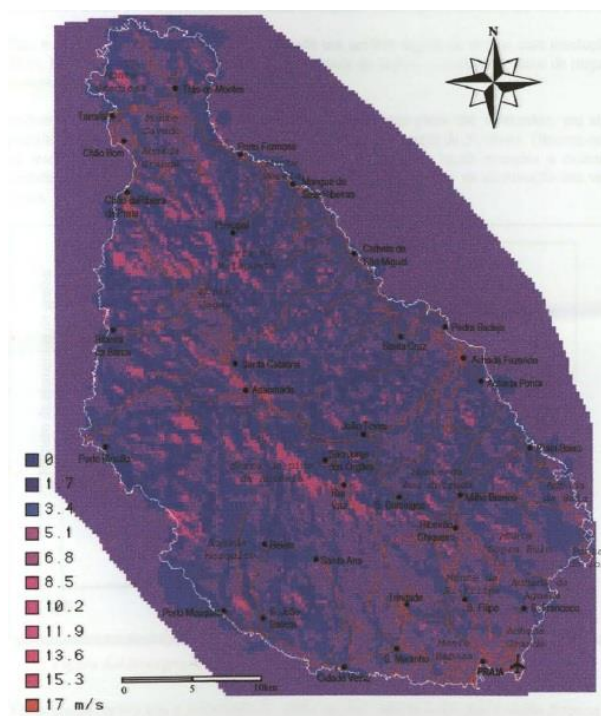
A metodologia foi aplicada para obter os valores do potencial eólico da ilha de Santiago, através do *software* WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*), a partir de dados meteorológicos da velocidade do vento num horizonte temporal de 30 anos. Foram calculados também os valores da radiação solar direta e difusa para a ilha.

O âmbito da aplicação da metodologia na ilha era identificar como as energias renováveis poderiam ser integradas na eletrificação das comunidades rurais (J. G Amador & Domínguez, 2005).

Nas Figuras 16 e 17, pode-se ver os mapas dos recursos eólicos e solar obtidos através da aplicação da metodologia na SOLARGIS para a ilha de Santiago, Cabo Verde.



*Figura 16: Média da radiação solar global na ilha de Santiago obtido partir da aplicação da SolarGIS*



*Figura 17: Velocidade média do vento calculado a partir do modelo SolarGIS na ilha de Santiago a 10 metros de solo*

Uma das recomendações do estudo, é que deveria haver uma extensão da rede elétrica até as áreas com maior densidade populacional e que estão mais próximas de um troço da rede elétrica existente. Por outro lado, que fossem desenvolvidos projetos de energias renováveis nas áreas mais isoladas, onde a população está mais dispersa e mais isolada.

Para além de Cabo Verde, a metodologia da SOLARGIS foi aplicada nos seguintes países: na Tunísia, nos Municípios de Kairouan, Mahdia and Monastir; no norte de Marrocos; no Estado do Pará, Brasil; em Córdoba, na Espanha e na ilha de Córsega, na Grécia.

O Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)<sup>6</sup> é um outro projeto da aplicação do SIG nas energias renováveis. O sistema fornece um *basemap* dos recursos energéticos solares, e faz uma avaliação da produção de energia a partir de sistemas fotovoltaicos instalados na Europa, África e no Sudeste Asiático (Belward et al., 2011).

Tiba et al., (2010) fizeram uma análise da utilização dos SIG como ferramenta de suporte a gestão e planeamento de energias proveniente de fontes renováveis em áreas semiáridas no nordeste do Brasil. Os autores expõem a importância da utilização dos SIG como uma ferramenta especialmente adequada para análise das variações espaciais que caracterizam os FER. Os mesmos autores fazem referência aos fatores que normalmente condicionam as fontes de energias mais diretas. Sendo que os recursos solares são fortemente condicionados pela altitude, latitude e condições fitogeográficas, já os recursos eólicos são afetados pela rugosidade e topografia do terreno. Finalmente a biomassa que é normalmente condicionada pelas características do solo e pelas condições pluviométricas (Tiba et al., 2010).

Os SIGs desempenham um papel fundamental na análise da variabilidade espacial desses fatores, ajudando assim, na tomada de decisão na implementação de empreendimentos alimentados por FER.

Numa análise multicritério feito por Baban & Parry (2001), utilizando os SIG para a localização de áreas potenciais para instalação de parques eólicos, os autores fazem referência a conjunto de fatores e restrições que devem ser considerados na avaliação das áreas potenciais, nomeadamente: a topografia, velocidade e direção do vento, uso e ocupação do solo, aspetos demográficos, acessibilidade, ecologia e recursos (Baban & Parry, 2001).

---

<sup>6</sup> Informações detalhadas sobre este SIG podem ser encontradas em [http://sunbird.jrc.it/pvgis/about\\_pvgis/about\\_pvgis.htm](http://sunbird.jrc.it/pvgis/about_pvgis/about_pvgis.htm)

Hansen (2005), também utilizou a técnica de análise multicritério em SIG na localização de áreas ótimas para desenvolvimento de parques eólicos. O autor foca a necessidade de melhor analisar as restrições ambientais, e um melhor planeamento e ordenamento do território, a quando da instalação de infraestruturas de produção de energia elétrica a partir de FER.

Simões (2004), na sua dissertação de mestrado desenvolveu uma metodologia para a criação de uma base dados relativa ao potencial energético proveniente do vento em Portugal. Para quantificação dos recursos eólicos de Portugal, a autora, aplicou dois modelos. Numa primeira fase recorreu ao modelo MM5, com uma resolução numérica de 9x9 km, para o mapeamento dos parâmetros meteorológicos. Numa segunda fase foi utilizado o *software*  $WA^sP$  para mapear os dados provenientes da estação anemométrica, situada em São João das Lampas. Através desse modelo obteve-se o mapa do potencial energético eólico a uma cota de 60 metros, com uma resolução espacial de 1 km, no qual permitiu determinar as grandezas envolvidas no tipo de estudo em causa, ou seja a velocidade média do vento, fluxo de potência incidente, e o número de horas equivalente a potência nominal. A aplicação de ambos os modelos resultou em mapas da distribuição espacial da velocidade do vento (Simões, 2004).

Gomes (2011), utilizou dados do LIDAR, para determinar o potencial solar em áreas urbanas. O modelo foi testado em um extrato do centro urbano da Vila de Carnaxide pertencente ao Concelho de Oeiras. Para além, de estimar o potencial solar incidente na área, o autor também, identificou a partir dos dados LiDAR, a cobertura dos edifícios com melhores condições para instalar painéis solares fotovoltaicos.

Cabo Verde, dadas as suas características climáticas, dispõe um abundante recurso solar. O estudo realizado em 2011 intitulado Plano Energético Renovável de Cabo Verde (PERCV, 2011), onde utilizaram os SIGs para calcular a radiação solar, refere que o arquipélago regista valores médios de radiação solar global em torno dos 1800 a 2000 kWh/m<sup>2</sup> (Figura 18).

Relativamente ao número de horas de sol anual, mais de metade do território nacional recebe valores superiores a 3750 horas de sol por ano (PERCV, 2011).

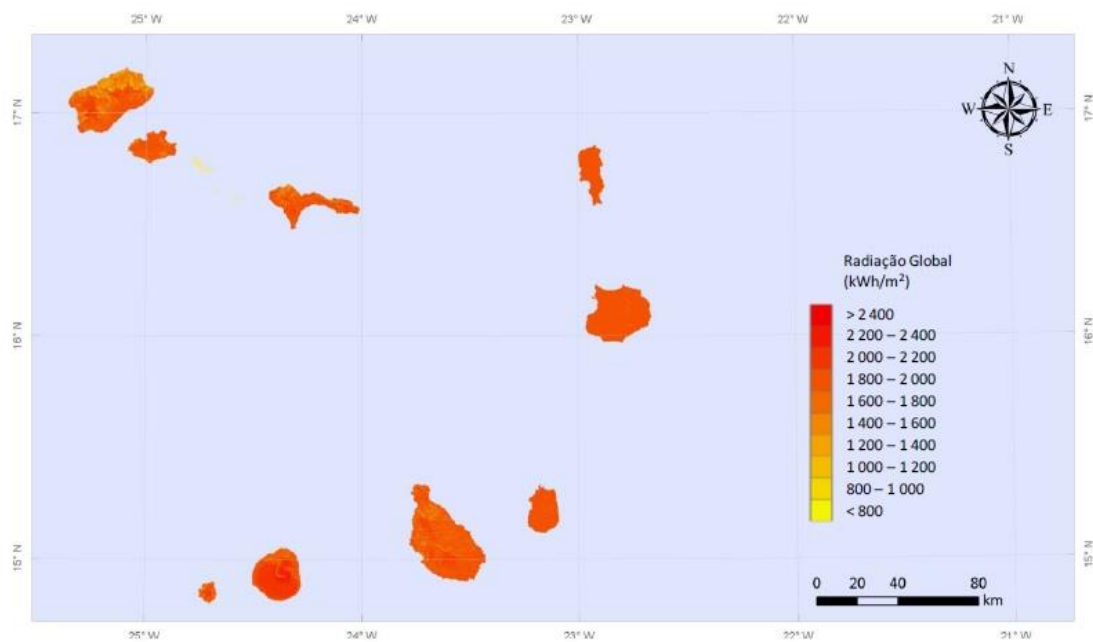


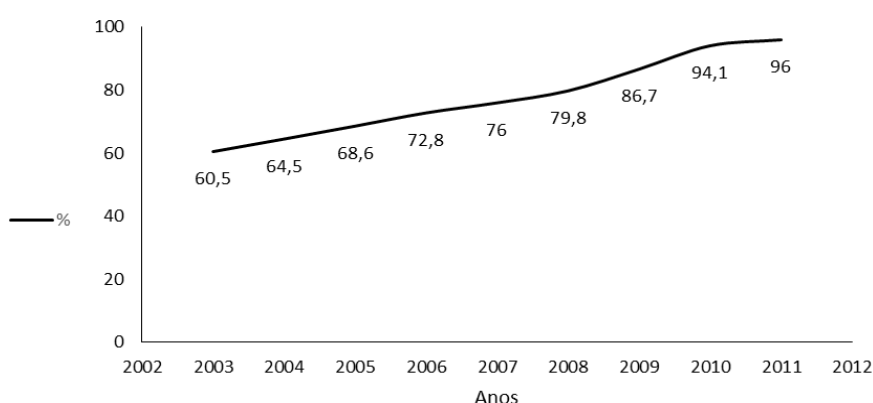
Figura 18: Radiação Solar Global no arquipélago de Cabo Verde em kWh/m² (PERCV, 2011)



## **Capítulo III. Avaliação do potencial da energia solar na ilha de São Vicente**

### **3.1 Caracterização do sistema energético de Cabo Verde**

Segundo o relatório do Plano Energético Renovável de Cabo Verde (PERCV, 2011), a taxa de cobertura das redes elétricas em Cabo Verde é de cerca de 95%. O mesmo relatório frisa que a taxa de cobertura das redes elétricas tem aumentado progressivamente nas diferentes ilhas, sendo que algumas ilhas já estão totalmente cobertas pela rede elétrica (PERCV, 2011). É o caso das ilhas do Sal e da Brava, que atingiram a taxa de cobertura de 100% em 2006, São Vicente e Boa Vista, em 2007, e S. Nicolau em 2008. A evolução da taxa de cobertura da rede elétrica entre 2003 a 2011 é apresentada na Figura 19.



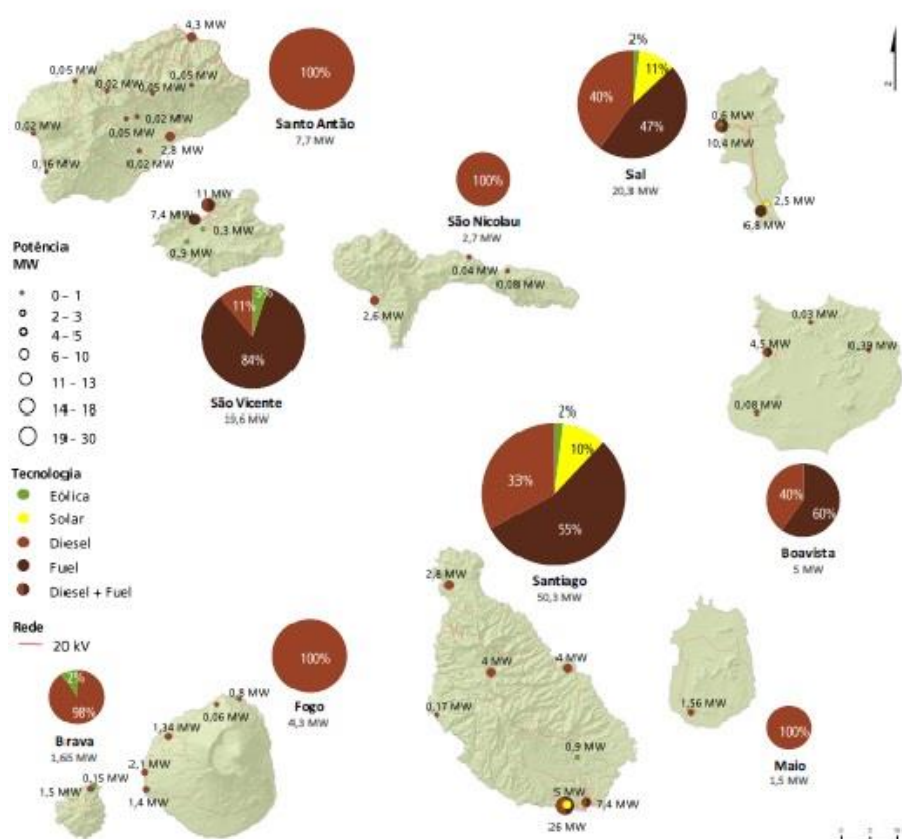
*Figura 19: Evolução da taxa de cobertura da rede elétrica entre 2003 a 2011 para o arquipélago de Cabo Verde (Fonte: Electra SA, 2012)*

Apesar dos vários avanços conseguidos, o sistema de fornecimento contínuo de energia elétrica às populações e aos diversos ramos de atividade económica, nas diferentes ilhas, ainda é bastante instável, marcado por frequentes e longos cortes no fornecimento de energia às populações, especialmente nos principais centros urbanos, como na cidade da Praia na ilha de Santiago e cidade do Mindelo na ilha São Vicente, afetando a população e os serviços públicos essenciais e todas as atividades económicas.

Os cortes de fornecimento de energia são geralmente causados por falhas e avarias nos grupos geradores, pela deficiente e antiquada rede de distribuição nalgumas ilhas, e muitas vezes por questões relacionadas com a sobrecarga da própria rede.

### 3.1.1 Potência energética instalada em Cabo Verde

O parque electroprodutor de Cabo Verde é constituído maioritariamente por centrais termoelétricas, alimentadas por combustíveis fósseis (PERCV, 2011). De acordo com o relatório do Plano Energético Renovável de Cabo Verde (PERCV, 2011), a potência atualmente instalada nas centrais, micro centrais e projetos renováveis é no total de 114 MW. A Figura 20 representa a localização das centrais produção de energia, de acordo com as diferentes fontes de produção energia elétrica no ano de 2010 em Cabo Verde.



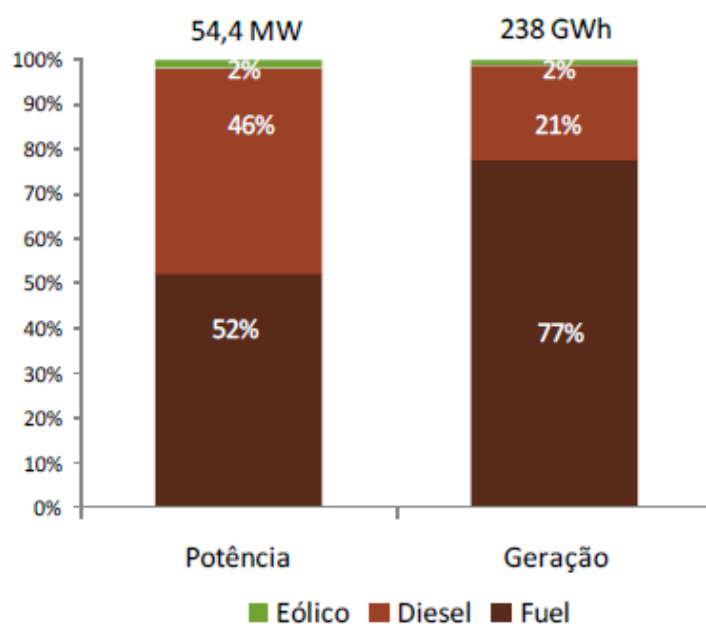
*Figura 20: Localização das centrais produtoras nas diferentes ilhas e municípios de Cabo Verde (PERCV, 2011)*

A Figura 20 representa apenas as grandes centrais que fornecem energia aos centros urbanos. Porém, existe um grande número de micro-centrais, não representados no mapa, espalhadas pelos vários municípios, e que fornecem energia elétrica às comunidades ou povoações mais isoladas, apenas durante algumas horas no período noturno, e que acarretam custos avultados para os municípios, pois geralmente, as

populações que beneficiem dessa energia pagam uma tarifa fixa simbólica, dado que não existe um sistema de contagem da energia daqueles que a consomem.

Outro dado a ressaltar no mapa é existência de alguns projetos de energia renovável instalados em algumas ilhas, entre as quais São Vicente, Santiago, Sal e Brava. Para além dessas ilhas, já se produz energia elétrica na a partir de fonte renovável também na ilha de Santo Antão.

A Figura 21 mostra a repartição da potência instalada e produção de eletricidade em Cabo Verde por tipo de fonte no ano de 2009.



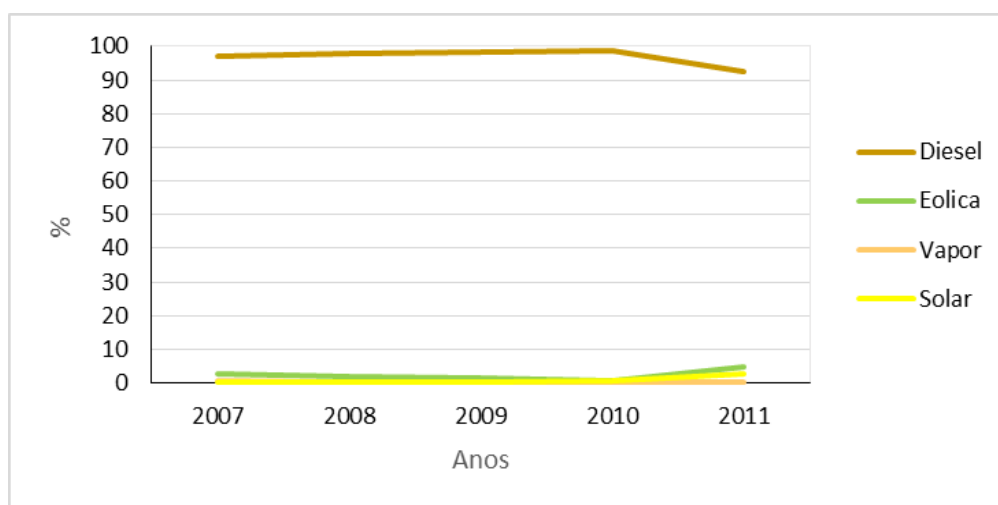
*Figura 21: Potência instalada e produção de eletricidade por tipo de fonte (PERCV, 2011)*

No gráfico (Figura 21) constata-se a forte dependência de Cabo Verde face aos combustíveis fósseis, especialmente o fuel, que alimenta cerca de 52% da potência instalada, e 77% da energia produzida, enquanto a energia renovável representa apenas 2% da potência instalada e energia produzida respetivamente em 2009.

A produção de energia através de fontes de energias renováveis, apesar de ter verificado uma maior dinâmica nos últimos anos, ainda é pouco significativa, como se pode ver na Tabela 2 bem como na Figura 22 que representa a evolução da produção de energia em kWh.

*Tabela 2: Evolução da produção de energia elétrica em Cabo Verde por tipo de fonte em KWh entre os anos 2007 a 2011 (ELECTRA, 2012)*

Anos	2007	2008	2009	2010	2011
Fontes	Diesel	260465	279645	290273	314315
	Eólica	6869	5510	4661	15.605
	Vapor	1185	640	0	0
	Solar	0	0	0	2105
Total kWh		268.519	285795	294934	318412



*Figura 22: Evolução da produção de energia em percentagem por tipo de fonte entre 2007 a 2011*

Note-se no gráfico (Figura 22) uma ligeira oscilação da produção de energia a partir de fontes não-renováveis (diesel). Aumentou de 97% em 2007 para 98,71% em 2009, e diminuiu em 2011 para 92,45%. Por outro lado, tem-se verificado um ligeiro aumento na produção de energia através de FER, com destaque para o aproveitamento da energia eólica que evoluiu de 2,56% no ano de 2007 para 4,80% no ano de 2011. Quanto à energia solar, os primeiros projetos (Centrais fotovoltaica da ilha do Sal e da cidade da Praia) só começam a ser explorados no ano de 2010 (0,66%), representando no ano 2011, 2,75% do total da energia produzida.

Porém, no ano de 2012 com a implementação de novos projetos e entrada em funcionamento de alguns parques eólicos que se encontravam em construção (parques eólicos das ilhas de Santo Antão localizado na zona de Aguada de Janela, de São Vicente localizado no Monte Flamengos, de Santiago situado no Monte São Filipe), a

penetração de energia elétrica produzida a partir de fontes renováveis, aumentou substancialmente, atingindo uma taxa de penetração de 25% (ECREEE, 2012).

### **3.1.2 Sistema energético da ilha de São Vicente**

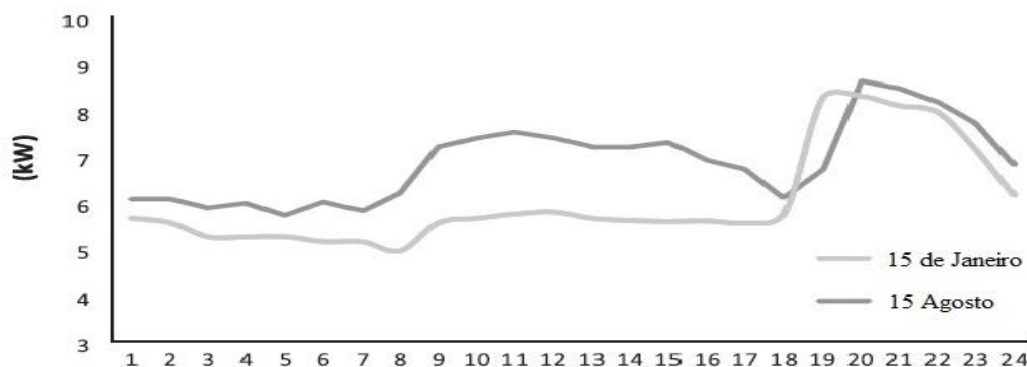
O cenário energético da ilha de São Vicente, é semelhante ao panorama geral de todo o arquipélago. Apresenta assim, as mesmas características e dificuldades que as outras ilhas.

O parque electroprodutor da ilha de São Vicente é constituído por duas centrais termoelétricas, alimentadas por combustíveis fósseis, situadas nas localidades de Maciota e Lazareto, e um parque eólico instalado na localidade de Monte Flamengos a 6 km da cidade do Mindelo.

De acordo com o relatório de contas da Electra, SARL, do ano 2011 (ELECTRA, 2012), a produção de energia na ilha a partir de fontes renovável, neste caso a energia eólica, foi de 5608,2 kW no ano de 2011. Não foi possível encontrar dados oficiais relativamente a produção de energia de a partir de fontes renováveis na ilha nos anos de 2012 e 2013.

A procura e, o consumo de energia na ilha são relativamente estáveis durante todo o ano, dado que não há grandes variações climáticas, capazes de fazer oscilar o consumo de energia elétrica (Segurado, Krajacic, Duic', & Alves, 2011).

A Figura 23 mostra a variação do consumo de energia na ilha num dia de inverno (15 de Janeiro) e num dia de verão (15 de Agosto) de 2005. É visível na figura que entre as 08 horas e as 18 horas o consumo de energia se mantém quase que constante. No entanto partir das 18:00 horas, o consumo começa a aumentar atingindo os picos mais altos entre 20:00 e as 21:00 horas.



*Figura 23: Consumo de energia num dia de inverno (15 de Janeiro) e num dia do verão (15 de Agosto) (Segurado et al., 2011)*

É importante referir que a ilha é dependente de água dessalinizada, processo que exige grande consumo de energia elétrica, e que normalmente tende a agravar-se nos períodos mais quentes do ano, ou seja entre os meses de Junho a Agosto.

## **3.2 Cálculo da radiação solar**

### **3.2.1 Modelos de cálculo da radiação solar**

Segundo Sorensen & Meibom (1999), a maioria dos potenciais fontes de energias renováveis, são diretamente dependentes do sol. A radiação solar é fundamental na maior parte dos processos físicos e biofísicos na superfície terrestre (Fu & Rich, 2002).

Como tal, vários modelos têm sido desenvolvidos para a estimação da radiação solar incidente numa determinada área.

Um dos primeiros modelos da estimação da radiação solar foi a *SOLARFLUX*, desenvolvido por Hetrick et al. (1993). O *SOLARFLUX* é um modelo criado para calcular a insolação numa determinada área, baseado no declive do terreno, na orientação das vertentes, no ângulo solar (azimute e zénite) e nas formas de relevo.

O modelo foi implementado em linguagem AML, no *software ARCINFO*, e calcula a radiação solar direta, a duração da luz solar, a radiação difusa e a porção do céu visível (*skyview*).

Sorensen (2001), desenvolveu um modelo para quantificar o potencial solar fotovoltaico em diferentes épocas do ano, num SIG. Os dados utilizados na análise do modelo foram provenientes de: i) satélites de medição da radiação, albedo, cobertura de nuvens e atenuação da radiação no ar; ii) dados do clima; iii) equações de equilíbrio e circulação global. O objetivo do modelo era determinar a quantidade de radiação solar numa superfície inclinada. Assim, o autor utiliza a latitude do local como sendo o ângulo ótimo para a instalação de um sistema fotovoltaico. O modelo parte do pressuposto de que a radiação solar numa superfície inclinada nos meses de Janeiro e Julho é muito semelhante a radiação solar numa superfície horizontal nos meses de Outubro e Abril. Enquanto a radiação solar numa superfície horizontal nos meses de Janeiro e Julho podem ser mais baixo, ou mais alto em relação a radiação solar numa superfície inclinada nos meses de Abril e Outubro. Adotando este pressuposto, o autor utilizou dados da radiação solar de um plano horizontal nos meses de Abril e Outubro

para estimar os valores de irradiação numa superfície inclinada nos meses de Janeiro e Julho, a partir uma média simples de dados dos meses de Janeiro e Julho.

O modelo quantifica apenas 12 % da radiação solar presente na superfície, considerando que a eficiência típica de um módulo fotovoltaicos é de 15%, associando-lhe ainda uma redução de 25%, devido a perdas no processo de conversão da radiação incidente para energia elétrica. A partir deste método o modelo consegue estimar o potencial solar fotovoltaico para os meses de Janeiro, Abril, Julho e Outubro para qualquer região do globo terrestre (B. Sorensen, 2001).

Um outro modelo denominado de *r.sun* foi desenvolvido por Hofierka & Šúri (2002), para calcular a radiação solar incidente numa determinada área. O modelo foi desenhado com base num outro modelo elaborado por Hofierka, (1997), e implementado num *software* SIG de código aberto. Segundo Hofierka & Šúri (2002) o propósito do modelo era de colmatar os erros apresentados em modelos anteriores.

No modelo *r.sun* a radiação solar global é calculada pelo somatório da radiação solar difusa, refletida e direta, para condições de céu limpo e de nebulosidade.

Os dados de entrada (*input*) utilizados no modelo foram: i) modelo digital de terreno (MDT) ii) período temporal em que se quer calcular a radiação; iii) e adicionalmente o tempo solar local. Para além desses parâmetros bases, outros fatores podem ser utilizados de acordo com as necessidades do utilizador (Hofierka & Šúri, 2002).

A partir dos dados de entrada calcularam: i) o ângulo solar incidente; ii) mapa de radiação solar (difusa, refletida e direta) anual ou para um dia específico; iii) duração da insolação.

O modelo permite calcular a radiação solar a diferentes escalas temporais e espaciais, que podem ser aplicados em várias áreas, entre as quais a avaliação do potencial para a produção de energia fotovoltaica, práticas agrícolas entre outros (Hofierka & Šúri, 2002).

Izquierdo et al., (2008) desenvolveram um modelo para estimar o potencial técnico dos telhados para instalação de painéis fotovoltaico nas áreas urbanas de Espanha.

Para obter o potencial técnico dos telhados dos edifícios, o modelo foi dividido em três fases:

- i) Cálculo do potencial físico ou quantidade de radiação solar recebida na área de análise;
- ii) Fatores geográficos que condicionam o aproveitamento da radiação solar;
- iii) Estimativa do potencial técnico do edifício, levando em conta também as características dos painéis a utilizar para transformar o recurso solar em energia elétrica.

Para calcular o potencial da radiação solar na área de análise definida na primeira fase do modelo, foram utilizados dados provenientes de estações meteorológicas distribuídas da seguinte forma: 64 em Espanha, 40 em Portugal, 4 nas ilhas Baleares, 2 nas ilhas Canárias, 1 em Ceuta e Melilha. Também foi utilizado um modelo digital de terreno de modo a ter em conta os fatores que originam áreas de sombreamento. A partir desses dados foi calculada a radiação solar incidente na área análise, obtendo mapas de radiação solar mensais com uma resolução de espacial de 200 metros.

Para calcular a área potencial para radiação de painéis fotovoltaicos, o modelo baseia-se numa amostragem estatística da tipologia dos edifícios dos concelhos de Espanha. A tipologia dos edifícios é definida com base em duas variáveis: i) a densidade da construção; e a ii) densidade populacional.

Três restrições são aplicadas para o cálculo da área dos telhados para implantação de sistemas fotovoltaico, definidos pelos seguintes coeficientes: i) Coeficiente da fração vazia ( $C_v$ ), que considere os vazios nos edifícios; ii) Coeficiente de sombreamento ( $C_s$ ) para determinar o sombreamento gerado por outras construções, objetos, ou pela própria configuração do telhado; iii) Coeficiente de serviços ( $C_f$ ), para excluir os edifícios que tem outros aplicativos instalados (antenas, equipamentos de telecomunicações).

Apenas foi tido em conta edifícios construídos em áreas urbanas, excluindo da análise edifícios situados em áreas industriais (Izquierdo et al., 2008).

Kassner et al., (2008), utilizando dados LiDAR, desenvolveram um modelo para o estimar e analisar o potencial energético solar na cobertura de edifícios. O modelo foi testado em 13 edifícios de morfologia variada dentro do campo urbano da Universidade de Colônia, Alemanha.

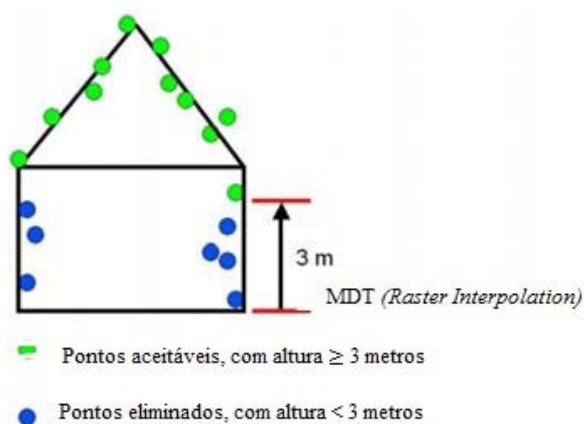
Para análise da cobertura dos telhados foram usados dois modelos digitais de elevação irregulares:



- i) Modelo Digital de Terreno (MDT), para análise da morfologia do terreno, excluindo os edifícios e a vegetação. A distância média dos pontos utilizados no modelo varia de 1 a 5 metros, e uma precisão de altura de +/- 50 cm;
- ii) Modelo Digital de Superfície (MDS), de modo a ter informação sobre os objetos na paisagem, nomeadamente a altura dos edifícios e da vegetação caso exista. A distância média dos pontos utilizados no modelo varia de 1 a 2 metros e uma precisão de altura de +/- 30 cm.

A avaliação dos resultados provenientes dos dados do LiDAR, foi feita a partir de uma fotografia aérea, em ambiente CAD, criando um modelo tridimensional (3D), da cobertura dos edifícios.

De forma a obter um modelo mais próximo da realidade, o modelo 3D dos edifícios, foi importado para um ambiente SIG, e convertido para 2D de modo a ter os limites ou contornos dos edifícios. Foi feita uma interpolação entre o MDT e os pontos LiDAR, e o contorno dos edifícios. Através dessa interpolação obtém-se um conjunto de pontos dentro da área dos edifícios, da qual eliminaram todos os pontos com valor inferior a 3 metros de altura ( Figura 24).



*Figura 24 Cálculo da altura dos edifícios partir de dados do LiDAR. Adaptado de (Kassner et al., 2008)*

Para definir a inclinação da cobertura dos edifícios foi feita uma interpolação *Raster*, dos pontos LiDAR, do qual fez-se a seguinte classificação: i) coberturas planas com uma inclinação inferior a 10°; ii) coberturas inclinadas em que o ângulo de inclinação varia entre 10° e 60°.

Para uma maior precisão no cálculo da radiação solar incidente sobre os telhados, foi fizeram também o cálculo do sombreamento dos telhados dos edifícios, através da

sobreposição das sombras projetadas por diferentes posições do sol (Kassner et al., 2008).

Segundo Kassner et al. (2008) o cálculo do potencial solar dos edifícios através da modelação da exposição azimutal, sombreamento e inclinação, apresenta resultados satisfatórios, desde que os dados de entrada para modelo sejam qualidade suficiente.

### **3.3 Metodologia para cálculo da radiação solar na ilha de São Vicente**

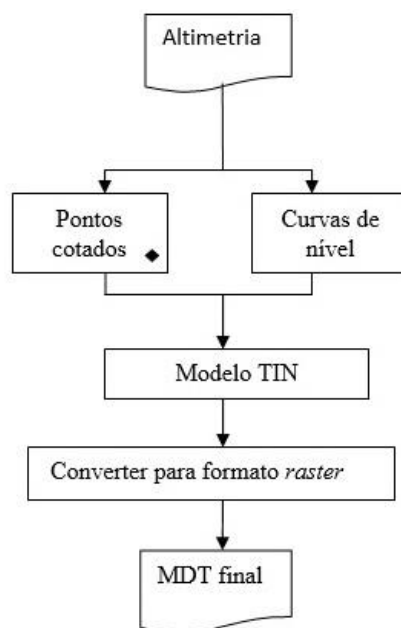
#### **3.3.1 Pré-processamento de dados para construção do modelo digital de terreno (MDT)**

A construção do Modelo Digital de Terreno (MDT) com um bom nível de exatidão é de extrema importância para o cálculo posterior da radiação solar.

O MDT pode ser definido como um conjunto de informação em suporte numérico, que para uma determinada área, permite associar a um determinado ponto sobre um plano cartográfico o valor respetivo sobre da sua altitude (Matos, 2008).

No processo de construção do MDT, recorreu-se a conjunto de pontos cotados e curvas de nível de equidistância de 5 m, provenientes da cartografia digital de Cabo Verde a escala 1:10 000, produzido pela *Municipia, SA*, no ano de 2003, disponível no Ministério do Ambiente Habitação de Ordenamento do Território de Cabo Verde.

O fluxograma apresentado na Figura 25 representa os passos metodológicos seguidos na construção do MDT da ilha de São Vicente.



*Figura 25: Procedimento metodológico seguido para construção do MDT da ilha de São Vicente*

O primeiro passo consistiu em criar um modelo TIN, formando-se um conjunto de faces triangulares, calculadas com base na interpolação dos pontos presentes nos dados de entrada, originando vértices nos triângulos com coordenadas (x,y,z). Posteriormente, a criação da rede irregular de triângulos (TIN), esta foi convertida para uma grelha matricial com uma resolução espacial de 5 metros, que corresponde ao MDT final da ilha de São Vicente.

### **3.3.2 Modelo utilizado no cálculo da radiação solar na ilha de São Vicente**

Como foi visto no ponto anterior existem diversos modelos para calcular a radiação solar numa determinada área. Para calcular a radiação solar na ilha de São Vicente, foi escolhido o modelo *Solar Analyst* (Fu & Rich, 2000), que está inserido no *software* comercial ArcGIS 10.1.

De acordo com Fu & Rich, (2000), o modelo *Solar Analyst* pode ser categorizado em dois tipos: i) O método de pontos específicos, que permite calcular a radiação solar para um determinado local, a partir de um ficheiro de pontos específicos baseado na geometria da orientação superfície e do céu visível; ii) O método da área solar, que permite calcular a radiação solar para uma determinada área, tendo em conta a orientação da superfície e as sombras originadas pelo MDT ou MDS.

Neste trabalho utilizou-se o método de cálculo da radiação solar em área. Optou-se por este método pelo fato de este apresentar, algumas vantagens em relação aos outros, nomeadamente:

- i) Este método gera uma série de *outputs*, entre as quais a radiação solar global, a radiação solar difusa, radiação solar direta, a duração da radiação solar na área em análise entre outros;
- ii) O modelo necessita de dados simples de entrada (*input*), neste caso apenas o MDT ou MDS e o ângulo de inclinação (latitude do lugar);
- iii) Flexibilidade temporal, ou seja, pode-se calcular a radiação solar, em diferentes períodos de tempo (por dia, mês, ou anualmente);
- iv) O modelo oferece maior rapidez e precisão no cálculo da radiação solar (Fu & Rich, 2002);

Para a execução do cálculo da radiação solar para ilha de São Vicente utilizou-se como dado de entrada apenas o MDT. Sendo necessário inserir no modelo a latitude

referente à área de estudo. Foi assumido a latitude constante do MDT, resultante do sistema de projeção (Cabo Verde Cônica Secante Lambert), em que ele foi criado.

Um outro parâmetro a ter em conta no cálculo da radiação solar é o *sky size*, tem um valor pré-definido de 200 e representa a resolução do:

- i) *Viewshed* que representa a distribuição angular da visibilidade do céu face às obstruções existentes em cada direção;
- ii) *Sunmap* que calcula a radiação solar direta proveniente de cada direção do céu, na mesma projeção hemisférica que o *viewshed*, criando um mapa (*raster*) que representa a trajetória ou a posição aparente do sol, pois este varia ao longo do dia e ao longo do ano. Assim, o *sunmap* é calculado com base na latitude do lugar e na configuração do tempo que define os setores *sunmap*.
- iii) *Skymap* consiste na radiação difusa proveniente de todas as direções do céu, como resultado da dispersão causado por fatores atmosféricos (nuvens, partículas entre outros). O *skymap* é calculado pela divisão do céu numa série de setores, normalmente 8x8, definidos pelo zénite e o ângulo do azimuth. A cada um dos setores é atribuído um valor identificador único. Assim a radiação difusa é calculado para cada setor do céu com base na direção (zénite e azimuth).

Na Figura 26 é apresentada o *viewshed* o *sunmap* e *skymap*, com base nos parâmetros definidos para o cálculo da radiação solar na ilha de São Vicente no ano de 2012.

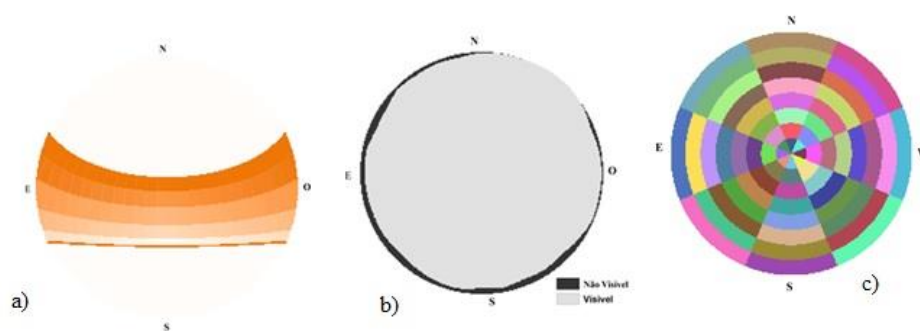


Figura 26: Gráficos dos parâmetros definidos no cálculo da radiação solar: a) *Sunmap*; b) *viewshed*; c) *skymap*

Segundo Fu & Rich, (2000), a radiação solar direta é determinada pela sobreposição do *viewshed* e o *skymap*. Assim, a radiação direta é calculada por todos os setores do *skymap* que não é obstruído pelo *viewshed*, com base na:

- i) Fração de abertura;

- ii) Posição do sol;
- iii) Atenuação atmosférica;
- iv) Orientação da superfície recetora.

A insolação direta total ( $Dir_{tot}$ ) sobre uma determinada área é dada pelo somatório da insolação direta ( $Dir_{\theta, \alpha}$ ) de todos os setores do *sunmap*, ou seja:

$$Dir_{tot} = \sum Dir_{\theta, \alpha}$$

A insolação direta dos setores *sunmap* com o centróide do ângulo zénite  $\theta$  e o ângulo azimuth  $\alpha$ , são calculados pela seguinte expressão<sup>7</sup>:

$$Dir_{\theta, \alpha} = S_{Const} * \tau^{m(\theta)} * SunDur_{\theta, \alpha} * SunGap_{\theta, \alpha} * \cos(AngIn_{\theta, \alpha})$$

Onde:

$S_{Const}$  – fluxo solar fora da atmosfera sobre a distância média entre o sol e terra conhecida como constante solar;

$\tau$  - Transmissividade da atmosfera no caminho mais curto;

$m(\theta)$  - comprimento do caminho relativo ótico;

$SunDur_{\theta, \alpha}$  - duração do tempo representado pelo setor do céu;

$SunGap_{\theta, \alpha}$  - é a fração de abertura para o setor *sunmap*;

Em relação ao modelo de radiação difusa foi adotado o céu uniforme (para situação de céu nublado ou céu claro), em que a entrada da radiação difusa é assumida como a mesma em todas as direções do céu.

O cálculo da radiação difusa para cada direção do céu é dada pela seguinte expressão<sup>8</sup>:

$$Dif_{\theta, \alpha} = R_{glb} * P_{dif} * Dur * SkyGap_{\theta, \alpha} * Weight_{\theta, \alpha} * \cos(AngIn_{\theta, \alpha})$$

<sup>7</sup> De acordo com Fu & Rich, (2000)

Onde:	$R_{glb}$ – radiação global normal;
	$P_{dif}$ – proporção da radiação global que é difundida
	$Dur$ – intervalo de tempo para análise
	$SkyGap_{\theta,\alpha}$ – fração de abertura para cada setor
	$Weight_{\theta,\alpha}$ – proporção da radiação difusa num dado setor do céu em relação a todos os outros setor;
	$AngIn_{\theta,\alpha}$ – ângulo de incidência entre o centroide do setor do céu e o eixo normal da superfície intercetada

Em relação ao modelo difuso de céu uniforme,  $Weight_{\theta,\alpha}$  é calculado da seguinte forma:

$$Weight_{\theta,\alpha} = (\cos\theta_2 - \cos\theta_1) / Div_{azi}$$

Onde:

$\theta_1$  e  $\theta_2$  – são a delimitação dos ângulos do zénite dos setores do céu;

$Div_{azi}$  – corresponde ao numero de divisões azimutais no *skymap*.

Finalmente a radiação solar global é obtido pelo somatório da radiação solar difusa e a radiação solar direta de todos os setores. Os cálculos da soma de todos os fatores são repetidos por toda a área geográfica em análise, produzindo deste modo, mapas de insolação. A seguinte expressão determina a radiação solar global:

$$Global_{tot} = Dir_{tot} + Dif_{tot}$$

O fluxograma apresentado na Figura 27 representa o fluxo metodológico seguido para calcular a radiação solar na ilha de São Vicente durante o ano de 2012.

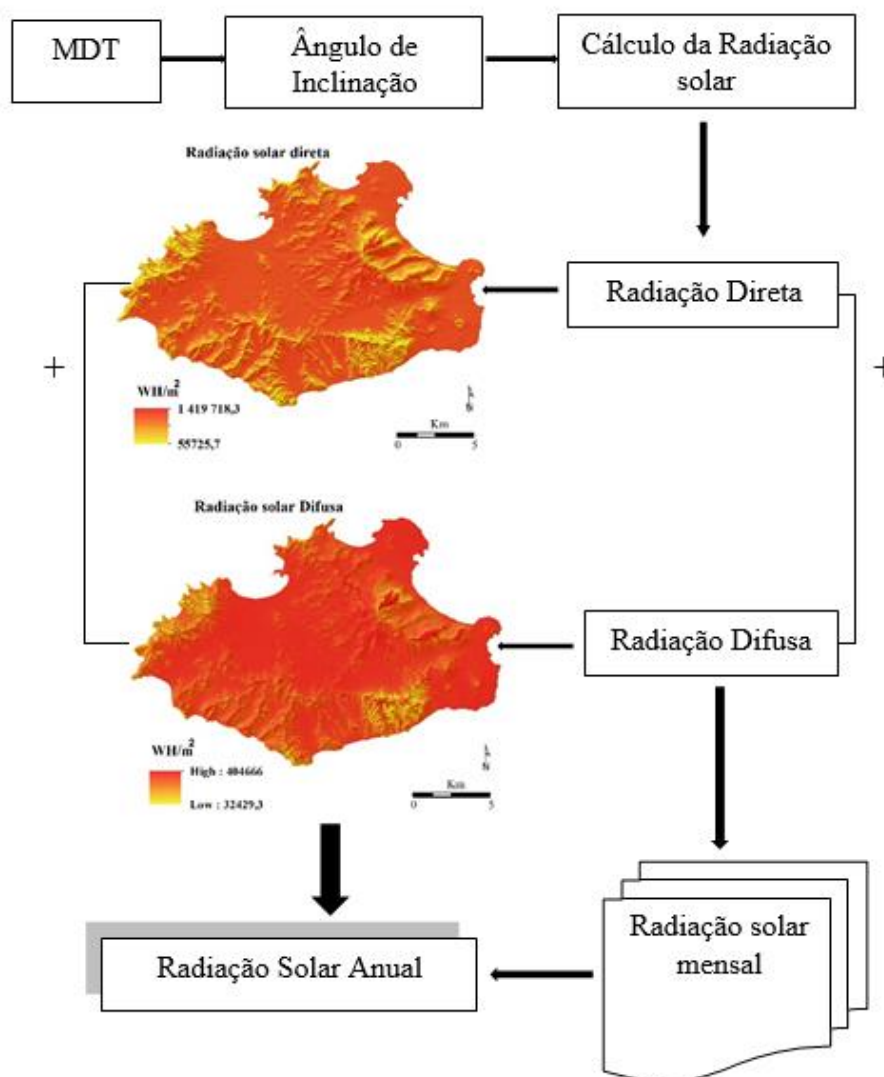


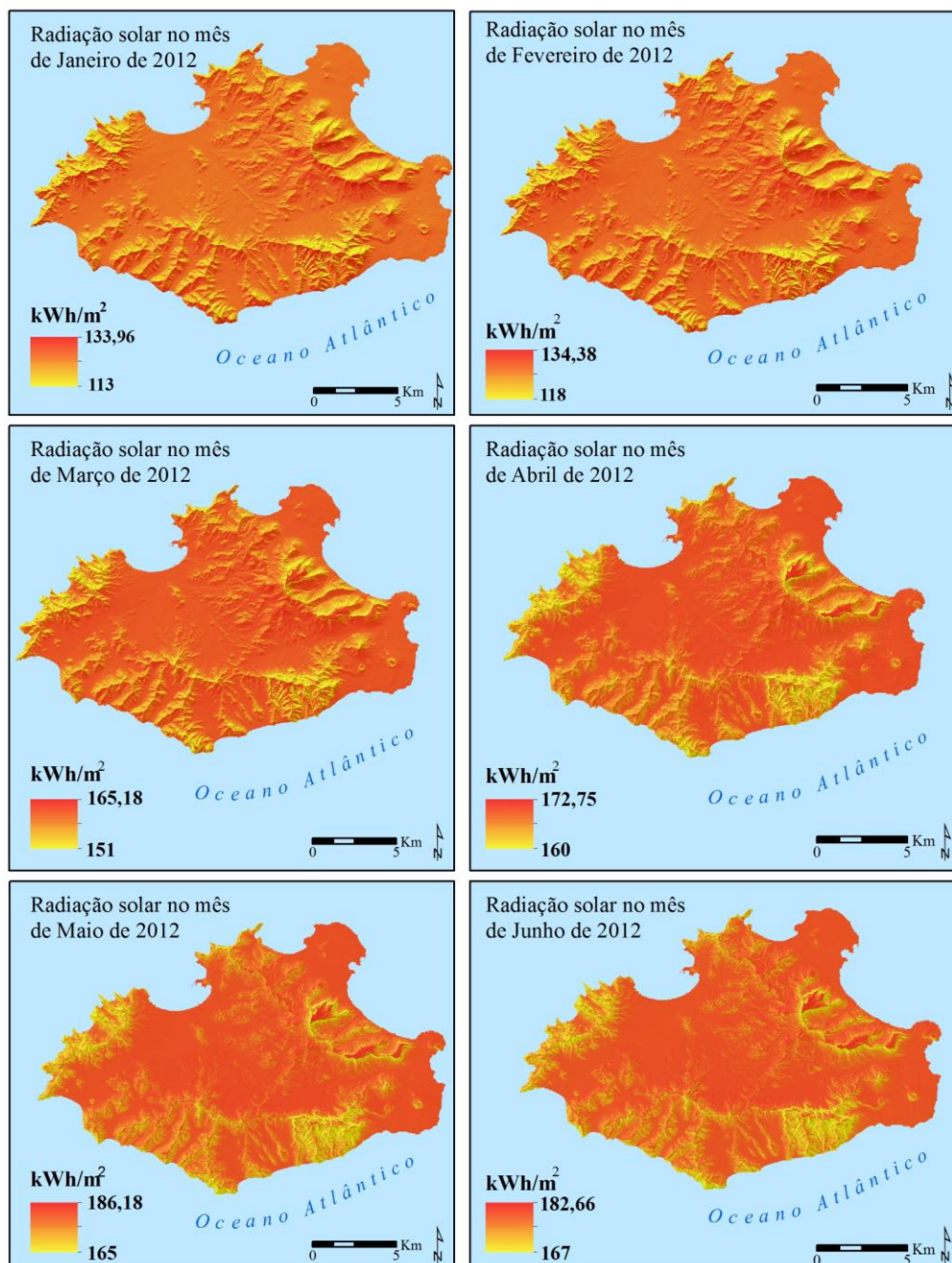
Figura 27: Procedimento metodológico para o cálculo da radiação solar em  $\text{Wh/m}^2$  na ilha de São Vicente

Para estimar a radiação solar incidente na ilha de São Vicente, para o ano de 2012, utilizou-se a radiação solar em área da extensão *Solar Radiation* do ArcGIS 10.1, tendo como dados de entrada o MDT com uma resolução espacial 5 metros criado anteriormente, e os parâmetros aferidos para a latitude da ilha de São Vicente.

### 3.3.3 Resultados

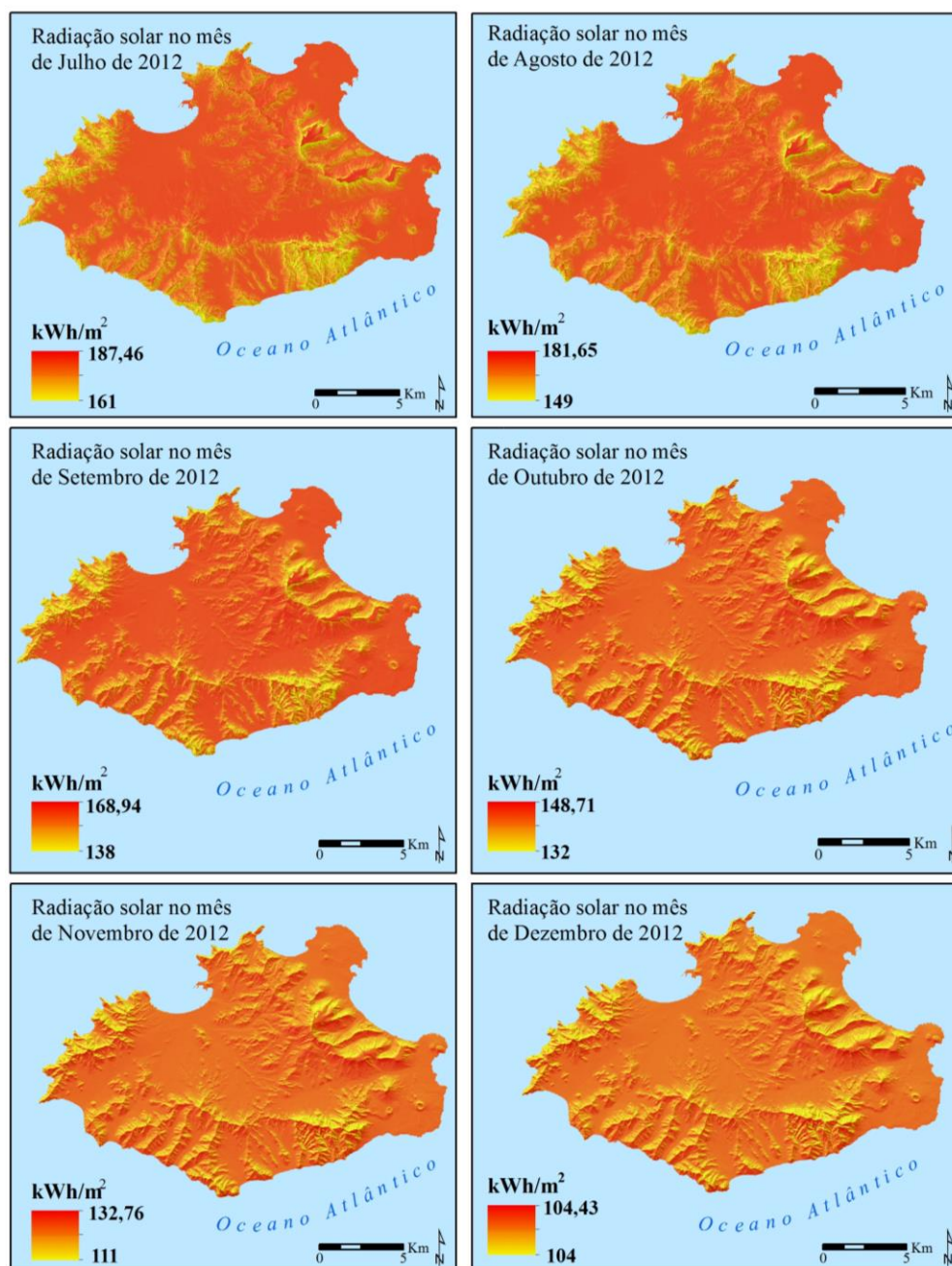
#### 3.3.3.1 Radiação Solar Mensal

A execução do modelo permitiu calcular a radiação direta e difusa. A soma da radiação difusa e direta resultou em 12 mapas da radiação solar global para a ilha de São Vicente, correspondentes aos diferentes meses do ano de 2012 (Figuras 28 e 29).



*Figura 28: Radiação solar em kWh/m² nos meses de Janeiro a Junho de 2012*



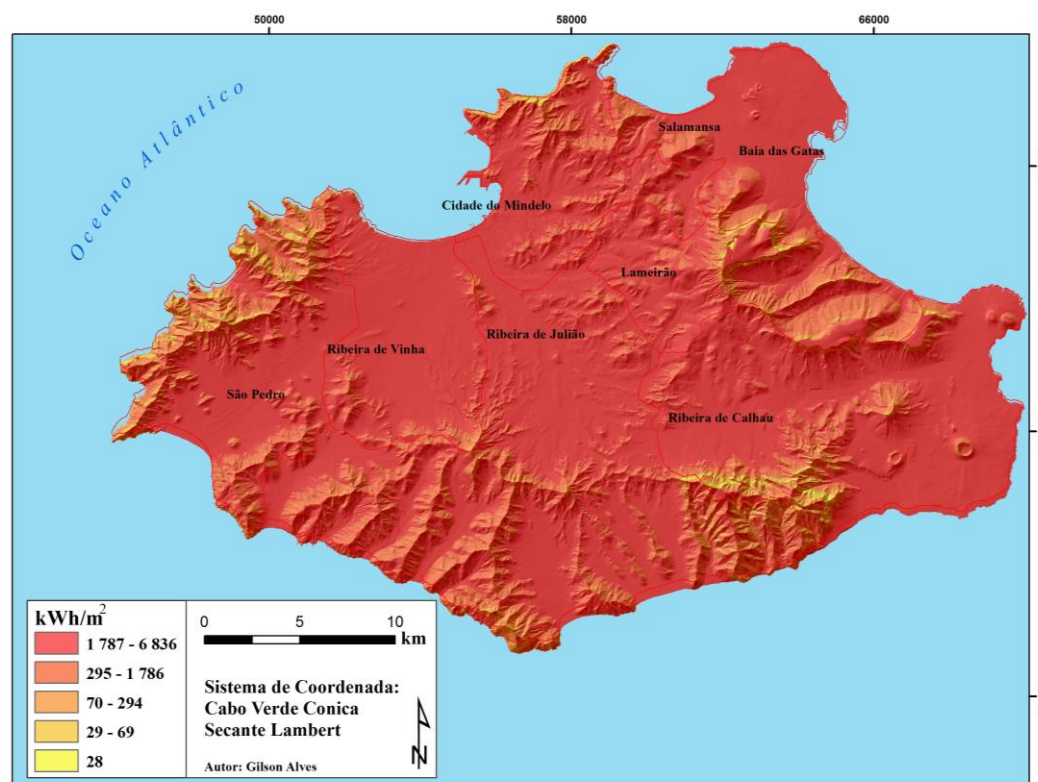


*Figura 29: Radiação solar kWh/m² nos meses de Julho a Dezembro de 2012*

O valor energético solar na ilha de São Vicente, nos vários meses do ano é substancial, o que comprova o grande potencial da ilha em termos de recurso energético solar. Entre os meses de Maio a Agosto registam-se maiores incidências da radiação solar na ilha, sendo Julho o mês com maior disponibilidade de energia solar, com uma máxima 187,46 kWh/m². A partir de Agosto a incidência da radiação solar baixa até Dezembro que é o mês com menor incidência da radiação solar. A incidência máxima no mês de Dezembro é de 104,43 kWh/m².

### **3.3.2.2 Radiação solar Anual em São Vicente**

A partir da soma da radiação solar de cada mês obteve-se a radiação solar global em Wh, e posteriormente convertido em kWh/m<sup>2</sup> (Figura 30).



*Figura 30: Radiação solar anual (2012) na ilha de São Vicente em kWh/m<sup>2</sup>*

No mapa constata-se a forte incidência da radiação solar, em quase toda a ilha, com uma variação mínima próximo dos 28 kWh/m<sup>2</sup> e o máximo de 6800 kWh/m<sup>2</sup>. As áreas de menor incidência da radiação solar, correspondem as áreas mais montanhosas, onde a orografia cria áreas sombrias e dificulta a incidência da radiação solar. Estes casos verificam-se mais a sul, sudoeste, também a nordeste da ilha.

A ilha apresenta uma média da radiação solar anual de cerca de 2210 kWh/m<sup>2</sup>. Este valor ligeiramente superior ao da média nacional, que segundo dados do (PERCV, 2011), que situa-se nos 1800 kWh/m<sup>2</sup>/ano, para a inclinação e exposição natural do terreno.

Se fizermos uma comparação entre da radiação solar incidente na ilha de São Vicente, e a radiação incidente na Europa no plano horizontal, onde as máximas

radiações globais registem valores em torno dos 1900 kWh/m<sup>2</sup>/ano<sup>9</sup>, constata-se que a ilha apresenta valores de incidência de radiação superior a continente europeu, e por conseguinte um enorme potencial em termos de recurso energético solar, por explorar.

---

<sup>9</sup>Mais informações e mapas da radiação solar incidente na Europa podem ser encontradas no sítio da SOLARGIS: <http://solargis.info/doc/71>

## **Capítulo IV. Análise Multicritério para localizar áreas favoráveis à instalação de parques solar na ilha de São Vicente**

### **4.1 Princípios básicos da avaliação multicritério**

As decisões espaciais envolvem normalmente um conjunto de alternativas viáveis, múltiplos conflitos e incomensuráveis critérios de avaliação (Malczewski, 2006). De acordo com Ozturk & Batuk, (2011) os problemas de decisão espacial podem ser caracterizados por diferentes preferências com respeito às consequências resultante da decisão tomada, e da importância relativa da avaliação dos critérios.

Carver (1991), refere que o objetivo básico da técnica de análise multicritério é investigar uma série de alternativas possíveis, à luz de vários critérios e objetivos conflitantes, para tomar a melhor decisão.

Segundo Hansen, (2005) análise multicritério é suportada por dois tipos de critérios que apoiam a tomada de decisão: as restrições e os fatores. As restrições são baseadas nos critérios booleanos (*true/false*), limitando a análise a regiões específicas, enquanto os fatores, são critérios que atribuem um certo grau de favorabilidade a todas as áreas em análise, definindo alternativas, de acordo com uma medida contínua de aptidão, realçando ou diminuindo a importância dos locais na região de análise, após a exclusão das áreas definidas como restrições.

Os fatores indicam graus contínuos de pertinência numa escala numérica que normalmente varia de 0 a 1 (Hansen, 2005). Este processo de normalização dos critérios é na sua essência idêntico ao processo de lógica difusa (Eastman, Jiang, & Toledano, 1998), que consiste em transformar qualquer escala noutra comparável e medida num intervalo normalizado de 0 a 1 (Rodrigues, 2001).

A técnica de análise multicritério, em combinação com os SIGs tem sido amplamente utilizados para a resolução de problemas de localização de empreendimentos energéticos de fontes renováveis (Baban & Parry, 2001; Carrion et al., 2007; Chaudhry, 2010; Hansen, 2005; Vicari, 2012; Zambon, A.E, Silva, & Negri, 2005).

A utilização da técnica de análise multicritério, implica a atribuição de um peso, a cada um dos critérios e subcritérios, visando quantificar a importância relativa de cada um. A atribuição dos pesos aos diferentes critérios, deve ser cuidadosa e o mais objetiva possível, permitindo que a decisão resultante da análise seja o mais ideal possível.

No entanto não existe um método consensual para atribuição dos pesos aos critérios existindo porém, na literatura várias propostas para tal (Malczewski, 2000; Ozturk & Batuk, 2011; Saaty, 1980, 2008; Voogd, 1982).

Nesta dissertação utilizou-se a técnica de *Analytic Hierarchy Process (AHP)*, desenvolvido por Saaty (1980), para atribuição dos pesos aos fatores em análise. A técnica do AHP, tem sido amplamente aplicada na atribuição dos pesos para a tomada de decisão. Segundo Saaty (2008), para tomar a melhor decisão possível, e de forma organizada, através do método do AHP, é necessário seguir os seguintes passos:

i) Definir o problema e objetivo que se pretende alcançar; ii) Estruturar os critérios em forma de hierarquia; iii) Construir uma matriz quadrada de comparação de pares, em que os critérios são comparados par a par; iv) Por último é atribuído um peso, a cada um dos critérios, de modo a obter o grau de importância de cada um.

Para fazer a comparação par a par e a consequente atribuição dos pesos a cada elemento, é necessário uma escala numérica que indica quantas vezes um critério é mais importante que outro. Na Tabela 3, é apresentada uma escala numérica proposto por Saaty, (1980) para quantificar a importância de cada critério.

*Tabela 3 Escala de números absolutos, que determinam a importância dos critérios*

<b>Grau de Importância</b>	<b>Definição</b>	<b>Descrição</b>
<b>1</b>	Igual importância	Dois critérios têm o mesmo contributo para o objetivo pretendido
<b>2</b>	Fraco	
<b>3</b>	Importância Moderada	Preponderância ligeiramente superior de um critério em relação a outro
<b>4</b>	Moderado Mais	
<b>5</b>	Forte Importância	Preponderância forte de um critério em relação a outro
<b>6</b>	Forte mais	
<b>7</b>	Muito forte	Preponderância de um critério é muito forte ou superior a outro.
<b>8</b>	Muito, muito, forte	
<b>9</b>	Extrema Importância	Preponderância de um critério em relação a outro é o mais alto possível

*Adaptado de: (Saaty, 2008)*

A aplicação do método AHP produz como resultado a atribuição de pesos á objetivos e alternativas, através da comparação dos elementos par a par (Baria & Fernandes, 2010).

#### **4.2 Metodologia**

A implementação de empreendimentos para a geração de energia solar, implica não só, quantificar a radiação solar no espaço geográfico em análise, mas também um conjunto de outros fatores que influenciem de forma significativa a viabilidade técnica e económica, para instalação e operação dos mesmos.

Após uma revisão bibliográfica sobre a aplicação da análise multicritério, e da combinação desta com os SIGs para a localização de áreas favoráveis para implementar empreendimentos de fontes de energias renováveis (Aydin, 2009; Aydin, Kentel, & Duzgun, 2010; Baban & Parry, 2001; Carrion, Estrella, Dols, & Ridao, 2008; Carrion et al., 2007; Hansen, 2005; Janke, 2010; Vicari, 2012), definiu-se um conjunto de critérios (6), que devem ser considerados aquando da implementação de um parque solar.

Na Tabela 4 estão elencados um conjunto de fatores que devem ser avaliados na implementação de um parque solar. Esses critérios, foram adaptados à realidade em estudo, que é a ilha de São Vicente.

*Tabela 4 Critérios considerados na análise para localização de áreas favoráveis para instalação de parques solar*

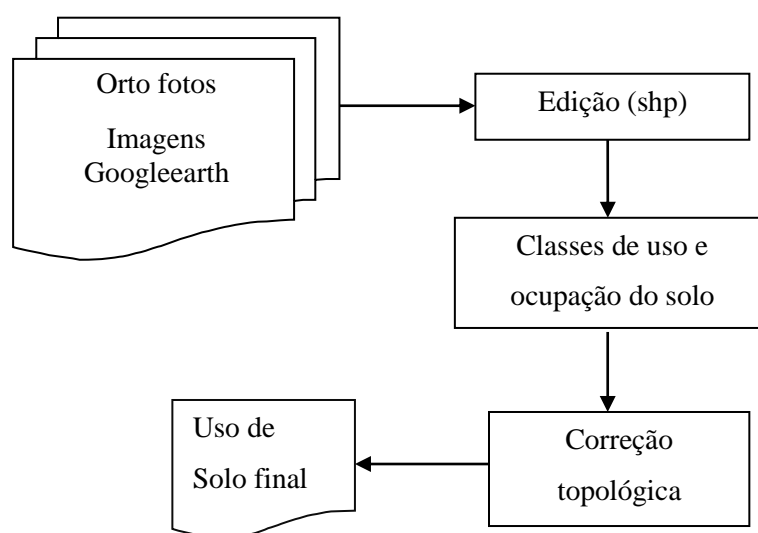
<b><i>Critério/Fator</i></b>	<b><i>Justificativa</i></b>	<b><i>Situação Ideal</i></b>
I. Potencial solar do lugar	A disponibilidade substancial de radiação solar, influencia diretamente a aptidão de um lugar para instalação de um parque solar	Quanto maior o potencial ou incidência da radiação solar, mais energia pode ser produzida
II. Proximidade as linhas de transmissão	A distância as linhas de transmissão de energia influencia os custos de instalação e de transmissão de energia produzida.	Quanto mais próximo das linhas de transmissão melhor, pois menor serão os custos relacionados com a injeção da energia produzida na rede. Neste caso definiu-se que um parque deve estar localizado, no máximo, a 2000 metros das linhas de transmissão de energia elétrica.
III. Proximidade a Rede Viária	A distância do local onde se quer instalar o parque solar em relação a rede viária, também influencia os custos de instalação e manutenção do empreendimento	Semelhante ao ponto anterior, dado que, quanto mais próximo da rede de estradas, menores serão os custos de instalação e manutenção. Por isso, definiu-se que o parque se deve localizar a uma distância máxima de 2500 metros de um troço de estrada.
IV. Uso do Solo e ocupação do solo	Neste critério existe um conjunto de restrições ambientais, legais, e de planeamento territorial, que devem ser considerados na análise.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Os parques devem respeitar uma distância mínima aos núcleos urbanos, pois constituem uma preocupação para a população. Deve também de evitar a poluição visual;</li> <li>• Evitar áreas protegidas que constituem condicionantes legais (servidão aeroportuária, áreas naturais protegidas);</li> <li>• Evitar árvores que produzem sombras (Acácias), de modo a não dificultar incidência da radiação solar;</li> </ul>
V. Declive	Terrenos bastante inclinados podem causar problemas técnicos, e aumentar os custos de instalação, além provocar sombras e assim reduzir a potencial solar da área.	Quanto mais plana a área de instalação, menor será os custos e mais fácil será a implementação técnica do parque.
VI. Hidrologia	Evitar construir nas principais linhas de água (leito das ribeiras), poços, furos.	A instalação de qualquer empreendimento deve respeitar uma distância de 300 metros das principais linhas de água.

#### **4.2.1 Pré-processamento de dados**

Para a realização da análise multicritério é necessário ter toda a informação cartográfica base, para posteriormente esta ser analisada e aplicadas na análise. Assim, para a obtenção de todos os mapas envolvidos nesta análise, foi necessário um conjunto procedimentos metodológicos que se descrevem nos pontos seguintes. Todas as informações cartográficas, utilizadas nesta etapa do trabalho, encontram-se projetadas no sistema de projeção cónica secante de Lambert, para Cabo Verde.

##### **4.2.1.1 Mapa de ocupação do Solo**

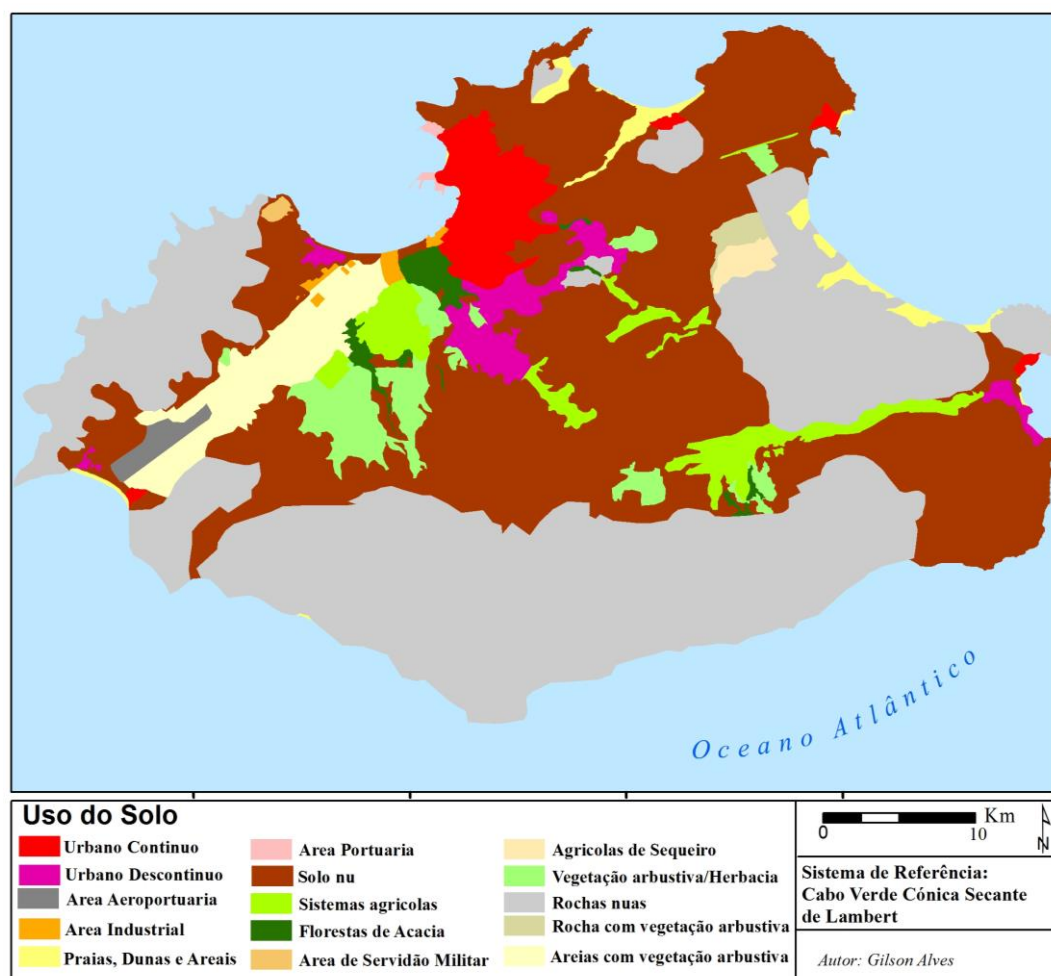
Um dos critérios a ser avaliados no processo é o uso e ocupação do solo na ilha de São Vicente. Dada a indisponibilidade dessa informação, foi necessário construir um mapa de uso do solo para a ilha. Assim, a carta de uso e ocupação do solo resultou de um longo processo de edição, tendo como informação de base os ortofotomapas do ano de 2003 e de 2010, e as imagens disponíveis no Google Earth. As classes de uso de solo foram definidas com base na realidade local, com auxílio de outros documentos, nomeadamente a nomenclatura da *Corine Land Cover* (Néry, 2007) e peças gráficas do EROT da ilha de São Vicente. A Figura 31, resume os procedimentos seguido para a construção da carta de uso do solo de São Vicente.



*Figura 31: Esquema metodológico seguido na criação do mapa de uso de solo*


















Na Figura 32 é apresentado o mapa de uso e ocupação do solo da ilha de São Vicente, produzido no âmbito desta dissertação.



*Figura 32: Carta de ocupação do solo da ilha de São Vicente*

A Figura 33, representa um catálogo com imagens do Google Earth, na qual se baseou para definir as classes de uso e ocupação do solo apresentado no mapa da Figura 32. É importante referir que o mapa de uso e ocupação do solo, foi produzido não apenas com recurso a imagens Google Earth, mas também por outros dados de base já citados.

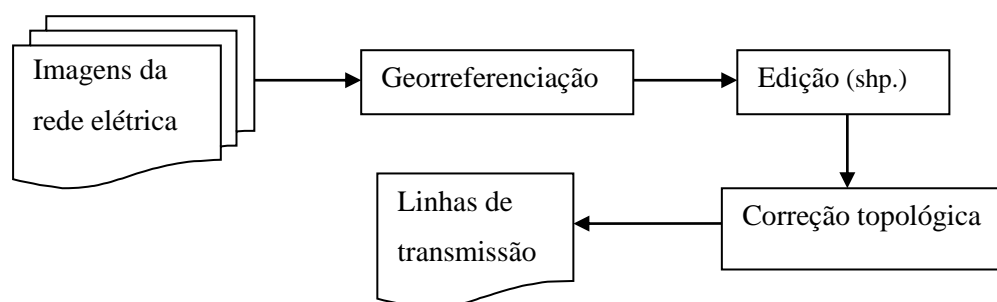
	<p><u>Urbano Contínuo</u> – classe atribuída às áreas em que mais 80% do solo é ocupado com construções urbanas, infraestruturas.</p>		<p><u>Rocha nua</u> – áreas escarpadas e afloramentos rochosos, depósitos de vertentes, áreas sem vegetação.</p>		<p><u>Urbano descontinua</u> - a maior parte do solo é ocupada por construções. Edifícios, infraestruturas estão associados a zonas com vegetação.</p>
	<p><u>Vegetação herbácea</u> - área com vegetação esparsa, pastagens, estepes.</p>		<p><u>Área florestal</u> – área maioritariamente coberta por acácias.</p>		<p><u>Área Portuária</u> infraestruturas de zonas portuárias, incluindo cais, docas e marinas.</p>
	<p><u>Sistemas agrícolas</u> -classe atribuída às áreas com parcelas de culturas diversas, e com edifícios dispersos.</p>		<p><u>Praias, areais e dunas</u> - áreas correspondente à praias, dunas e extensões de areal, e calhaus rolados e áreas costeiras.</p>		<p><u>Areais coberto de vegetação</u> - areias cobertas com vegetação esparsa ou herbácea.</p>
	<p><u>Solo nu</u> - áreas desprovidas de vegetação, construções ou qualquer outra atividade.</p>		<p><u>Área aeroportuária</u> - pistas de aterragem, edifícios e zonas associadas.</p>		<p><u>Área de Servidão Militar</u>- área destinados a instrução, treinos e exercícios militar.</p>
	<p><u>Rocha com vegetação</u> rocha coberta por vegetação esparsa ou herbácea.</p>		<p><u>Culturas de sequeiro</u> - áreas com culturas não irrigadas</p>		<p><u>Áreas industriais</u> - áreas com instalações industriais.</p>

*Figura 33 Catalogo utilizado para definir as classes de uso e ocupação solo na ilha de São Vicente*

#### **4.2.1.2 Linhas de transmissão de energia elétrica**

A proximidade as linhas de transmissão de energia, é um dos critérios que também foi avaliado no trabalho. A informação referente às linhas de transmissão também não estava disponível em formato digital, pelo que tivemos que desenhar a rede, baseando esta tarefa em imagens analógicas sobre as linhas de transmissão de energia da ilha de São Vicente. As imagens utilizadas para desenhar a rede foram adquiridas por digitalização a partir do trabalho de Garcia, (2010) intitulado “Análise e modelização da rede elétrica da ilha de São Vicente. Planeamento da rede no horizonte de médio prazo”. O processo de digitalização, georreferenciação e vectorização dos dados da rede pode gerar alguns erros, que se tentaram minimizar pelo cruzamento com outros documentos cartográficos, onde se pudessem identificar pontos que servissem de controlo ao desenho da rede entretanto elaborado.

Na Figura 34, está apresentado os passos metodológicos seguidos para o desenho das linhas de transmissão de energia na ilha de São Vicente.



*Figura 34 Esquema metodológico seguido para desenhar as Linhas de Transmissão de energia*

#### **4.2.1.3 Rede viária e Rede Hidrográfica**

A rede viária e a rede hidrográfica foram extraídas da cartografia digital 1:10 000 do ano de 2003 da ilha de São Vicente. A Figura 35 representa os procedimentos metodológicos para a extração da rede viária e da rede hidrográfica.

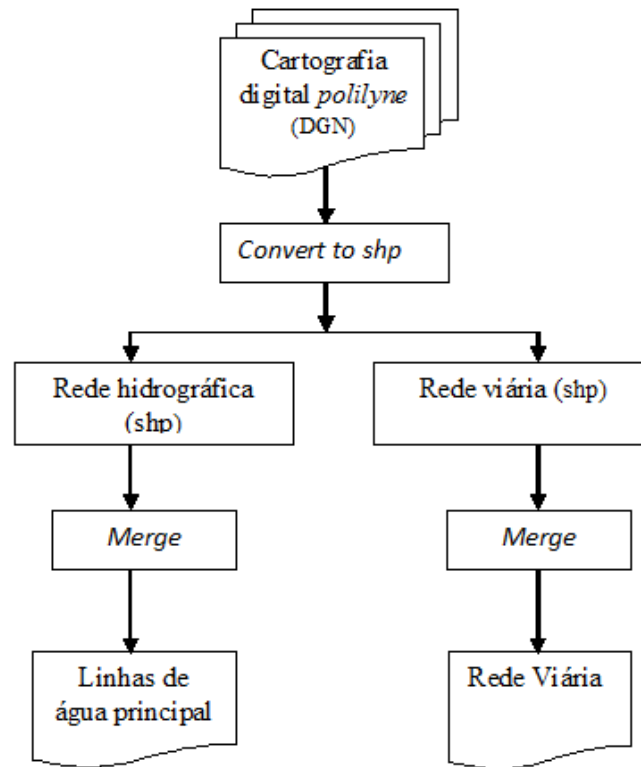


Figura 35: Processo metodológico seguido para extração da rede viária e a rede hidrográfica

Inicialmente começou-se por identificar o código que correspondesse a rede viária e a rede hidrográfica. Tendo identificado cada uma desta informação na cartografia base, fez-se uma operação de conversão destes dados para o formato *shapfile* (*shp*), pois a cartografia de base original não se encontrava num formato nativo SIG (nomeadamente *shapfile*) mas em formato CAD. Para converter os dados de CAD para *shp* utilizou-se a função *Feature Class to Shapfile*.

Para obter um único *layer* correspondente a cada uma destas informações, foi necessário efetuar uma operação *Merge*, e assim obter um ficheiro único para a rede viária e outro para a rede hidrográfica. Foi necessário fazer pequenas edições na rede viária, corrigindo alguns erros e eliminando informações desnecessárias e/ou redundantes.

#### 4.3 Processamento dos dados para localização de áreas favoráveis para instalação de parques solar

Após a definição dos critérios, passou-se a fase do processamento dos dados no ArcGIS 10, com vista a definição das áreas mais favoráveis para instalação de parques eólicos. Os procedimentos e passos metodológicos, seguido para definir as melhores áreas são apresentados no fluxo da Figura 36.

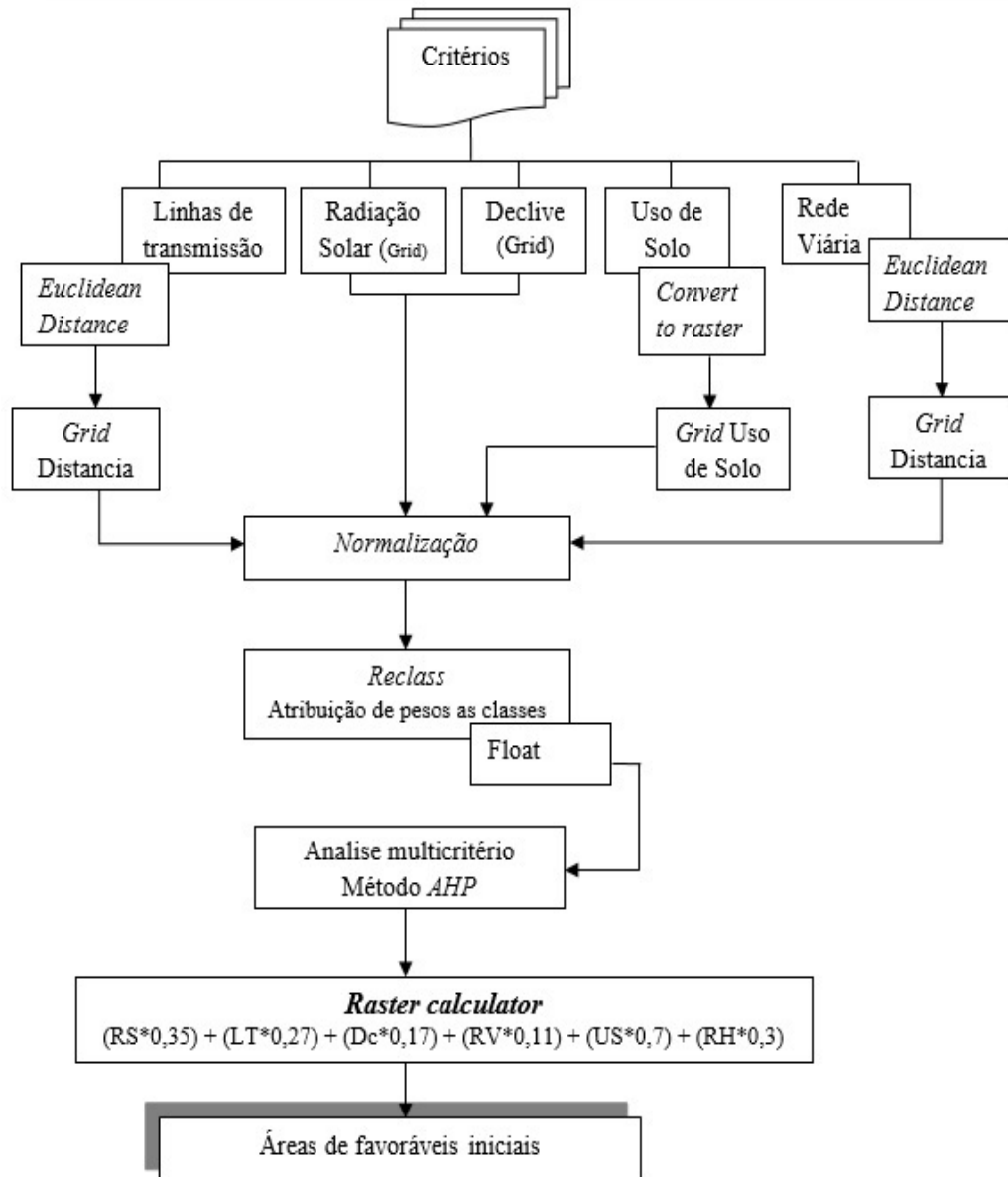


Figura 36 Fluxograma de procedimentos metodológicos para localização de áreas favoráveis iniciais para a instalação de parques solar

A análise espacial dos vários critérios, foi feita em formato *raster*. Assim, o primeiro passo no foi converter os dados que se encontravam em formato vetorial para

formato *raster*. Para a rede viária e as linhas de transmissão, utilizou-se a função *Euclidean Distance*, que encontra na ferramenta *Spatial Analyst* do ArcGIS, obtendo automaticamente um *raster* para cada um, representando as distâncias especificadas nos critérios de proximidade a rede viária e linhas de transmissão de energia.

Em relação ao uso do solo, definiu-se os pesos numa escala numérica de 0 a 1, para cada classe de acordo com o sua aptidão e depois convertido para o formato *raster*, através da função *polygon to raster*.

Tendo todos os dados em formato *raster* ou *grid*, passou-se a normalização dos mesmos.

O processo de normalização permite que valores de critérios não comparáveis entre si, sejam normalizados para a mesma escala visando a agregação entre eles (Zambon et al., 2005). A maior parte dos processos de normalização utiliza o valor máximo e o mínimo para a definição de uma escala, que habitualmente varia entre 0 e 1. Neste caso, utilizou-se a fórmula da variação linear definida pela equação 10 (Eastman et al., 1998):

$$X_i = \frac{R_i - R_{min}}{R_{max} - R_{min}} * \text{Intervalo normalizado} \quad (10)$$

$$\text{Onde: } \left\{ \begin{array}{l} R_i - \text{corresponde ao critério a ser normalizado} \\ R_{min} - \text{Valor mínimo para o critério} \\ R_{max} - \text{Valor máximo para o critério} \end{array} \right.$$

Após a normalização de todos os critérios para a escala de 0 a 1, os mapas foram reclassificados através de função *Reclassify* da ferramenta do *Spatial Analyst Tools*, em 10 classes, atribuindo a cada classe um peso (valor) na escala de 0 a 10, de acordo com o grau de favorabilidade de cada um. Esta operação não se aplicou ao uso do solo em que as classes já tinham sido classificadas antes de serem convertidos para o formato *raster*. Seguidamente os *rasters* foram convertidos para *floating-point* através da função *float*, de modo a converter os valores das células para valores decimais. Transformados em *float*, todos os critérios foram divididos por 10, obtendo *rasters* classificados de 0 a 1 (Figura 17).



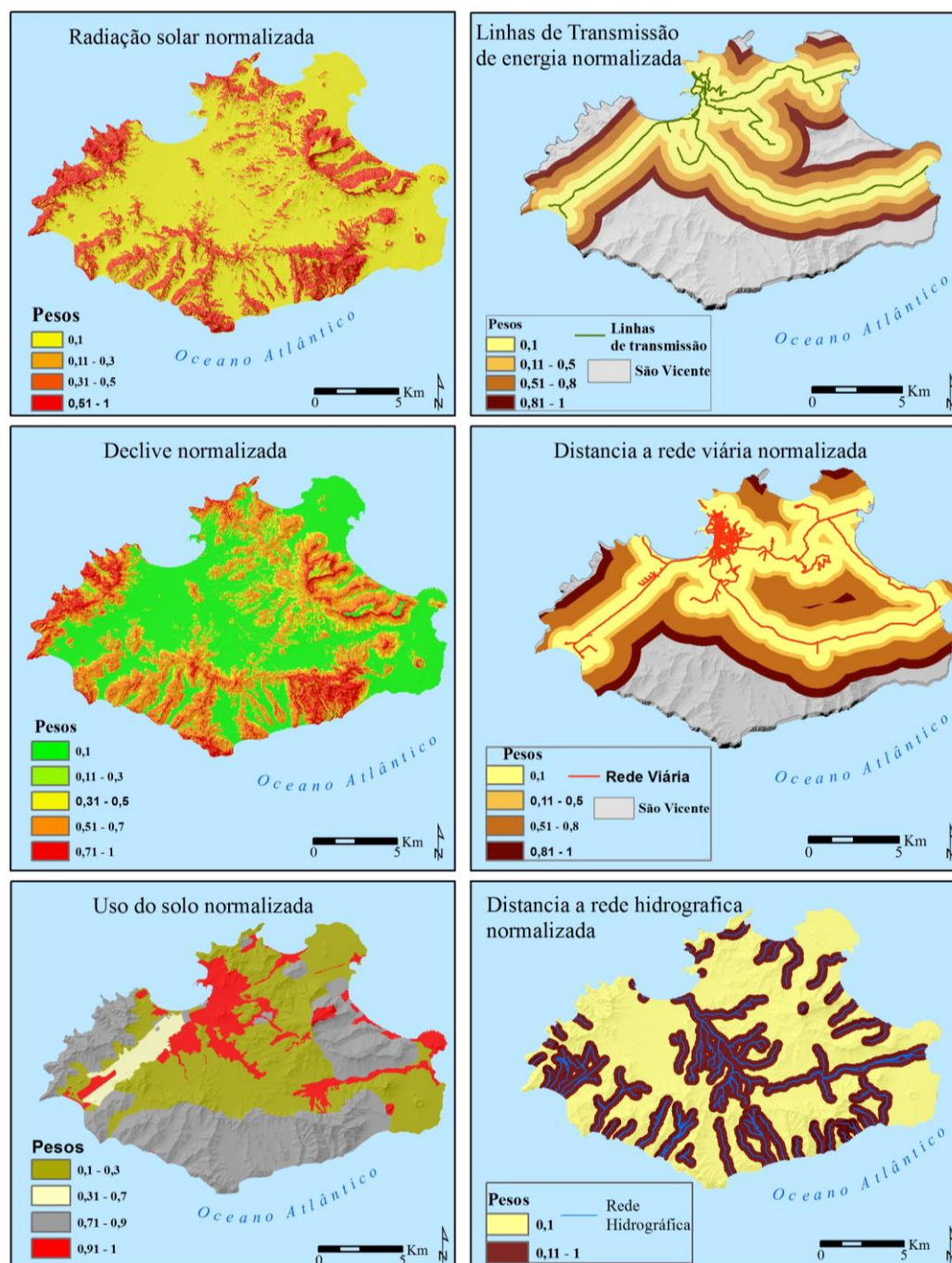


Figura 37: Critérios normalizados.

A próxima etapa foi a aplicação do método de *AHP*, para a definir a importância ou peso final de cada critério. Foi feita uma comparação par a par dos critérios envolvidos, aplicando a escala numérica, descrito na Tabela 4 para definir o grau de importância elementos em análise. A Tabela 5 resume o processo de comparação par a par entre os critérios.

Tabela 5 Comparação par a par para definir os pesos de cada critério segundo o método AHP

Critérios		Mais importante? A ou B	Escala (1 a 9)
A	B		
Radiação Solar	Linhas de Transmissão	A	3
	Declive	A	3
	Rede Viária	A	3
	Uso de Solo	A	3
	Linhas de água	A	7
Linhas de Transmissão	Declive	A	3
	Rede Viária	A	3
	Uso de Solo	A	5
	Linhas de água	A	7
Declive	Rede Viária	A	5
	Uso de Solo	A	3
	Linhas de água	A	5
Rede Viária	Uso de Solo	A	3
	Linhas de água	A	7
Uso de Solo	Linhas de água	A	7

Após a comparação entre os elementos da análise, e da atribuição dos pesos que define o grau de importância de um critério face a outro, obteve-se o peso final de cada critério (Tabela 6).

Tabela 6 Pesos final dos critérios em análise

Critérios	Peso Final	Ordem
Radiação Solar	35%	1
Linhas de transmissão	27%	2
Declive	17%	3
Rede Viária	11%	4
Uso do Solo	7%	5
Linhas de água	3%	6
Total	100%	**

Após a definição dos pesos para cada critério, foi feita uma através das ferramentas de análise *raster* disponíveis no *ArcGis 10* uma combinação linear



ponderada dos critérios, da qual resultou um mapa com as áreas favoráveis iniciais, para a localização de parques de produção de energia solar.

$$Af = \sum_{i=1}^{i=6} (Ci * Pi)$$

Onde:

Af – Áreas favoráveis para instalar parques solares

C<sub>i</sub> – Critérios definidos na análise (Tabela 4)

P<sub>i</sub> – Peso de Cada fator aplicado (Tabela 6)

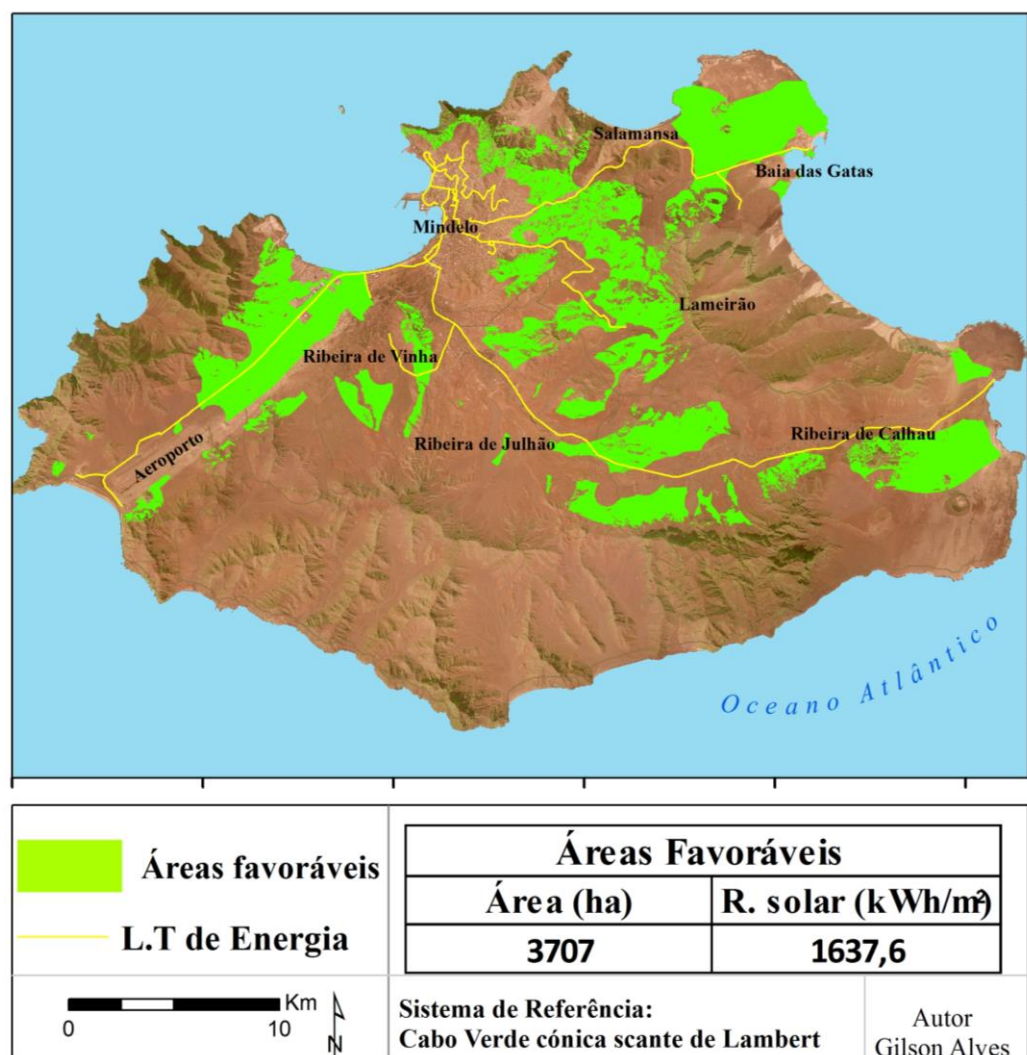
## **4.4 Resultados preliminares**

### **4.4.1 Áreas favoráveis iniciais**

A aplicação do modelo resultou, no mapa (*raster*) de aptidão inicial dos melhores lugares para a instalação dos parques solar. O raster com o resultado inicial foi convertido para polígonos (*vetor*), e é apresentado na Figura 38.

Numa primeira análise ao mapa, note-se que as áreas com maior aptidão para instalação de parques solar encontra-se a nordeste e noroeste, e também na zona centro da ilha. Estas áreas apresentam as melhores condições de acordo com os critérios definidos no modelo: forte incidência de radiação solar, proximidade das linhas transmissão de energia, áreas planas ou com baixa inclinação, e a maior parte deles em áreas de solo nu, ou sem nenhuma função.

Pode-se concluir nesta fase, que o modelo cumpriu todos os requisitos inicialmente pretendidos, resultando em um conjunto de áreas com aptidão para implementar centrais de produção de energia elétrica fotovoltaica. Porém, para que se tome a melhor decisão para instalação dos empreendimentos referidos, far-se-á no próximo ponto deste trabalho uma análise de conformidade entre as áreas inicialmente obtidas da aplicação do modelo SIG em combinação com a técnica de análise multicritério, com a carta de condicionantes do EROT (2012), recentemente saído da consulta, e em fase de correção, para a sua posterior apreciação e aprovação final.



*Figura 38 Áreas favoráveis iniciais para instalação de parques solares*

#### **4.5 Análise de conformidade entre as áreas favoráveis iniciais e a carta de condicionantes do EROT**

O esquema regional de ordenamento do território é uma das figuras de plano de ordenamento territorial, previsto no (Decreto-Legislativo nº 6/2010) que estabelece as Bases do Ordenamento do território e Planeamento Urbanístico de Cabo Verde.

As áreas de aptidão demonstrada na, cumprem quase todas as condições legais e ambientais previstas no regulamento e na carta de condicionantes do EROT da ilha de São Vicente. Porém, existem pequenas restrições que podem ser ajustadas, para que o modelo aplicado respeite todos os procedimentos legais e ambientais.

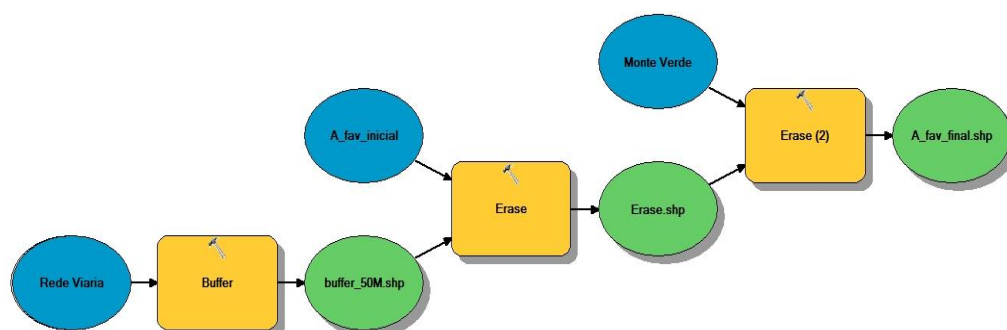
De modo a respeitar as servidões rodoviárias, incluída na carta de condicionantes e prevista no Decreto-Lei 22/2008 de 30 de Junho, que define uma área de não edificação (*non aedificandi*), de 50 metros para cada lado da estrada de 1ª classe.

Outro fator a ter em conta, são as áreas naturais protegidas. O Decreto-Lei nº 3/2003 estabelece o regime jurídico, dos espaços naturais que pela, sua relevância para a biodiversidade, função ecológica, interesse socioeconómico, cultural e turístico, merecem uma proteção especial.

Na ilha de São Vicente, apenas a área do Monte Verde está classificada como área protegida na categoria de parque natural (Decreto-Legislativo nº 3/2003).

Assim, para garantir que todas as áreas consideradas aptas para instalação dos parques para produção de energia solar não estejam dentro dos limites de áreas classificadas como protegidas, e que o corredor de 50 metros em ambos lados das estradas de primeira classe, utilizou-se as ferramentas do geoprocessamento, nomeadamente o *buffer* e o *erase*.

O modelo apresentado na Figura 39, representa os procedimentos e as ferramentas utilizadas.



*Figura 39 Procedimentos seguidos para salvaguardar as áreas protegidas e a distância as estradas*

Após ter aplicado o *buffer* com um raio de 50 metros em ambos os lados das estradas, fez-se uma sobreposição com as áreas favoráveis iniciais e aplicou-se a função de *erase*, para e assim evitar que as áreas com aptidão para instalar parques, atravessem ou estejam demasiado próximos dos troços de estradas.

Em relação as áreas protegidas, a ilha de dispõe apenas de uma área oficialmente classificada como protegida, na categoria de parque natural, a área do Monte Verde.

Para salvaguardar que esta área não sofra nenhuma intervenção, aplicou-se também a função de *erase*, tendo como *inputs*, o *layer* das áreas favoráveis iniciais e o *layer* da área protegida do Monte Verde.

#### **4.6 Resultados finais**

Tendo feito uma análise de conformidade com a carta de condicionantes do EROT da ilha de São Vicente, e alguns reajustes no modelo, definiram-se três grupos de áreas, de acordo com o grau de aptidão de cada um, para instalação de parques solares na ilha de São Vicente:

- i) Área 1 classificado com o grau de aptidão “++”, por apresentar as melhores condições técnicas e menores custos de instalação.
- ii) Área 2 classificado com o grau de aptidão “+”. Cumpram todos os critérios inicialmente definidos, mas não são tão favoráveis como a área 1.
- iii) Área 3, classificado com o grau de aptidão “-”. Apesar de estarem em conformidade com os critérios iniciais, a construção nestas áreas, implicariam maiores custos, do que as duas áreas anteriores por vários fatores que se enumeram na tabela

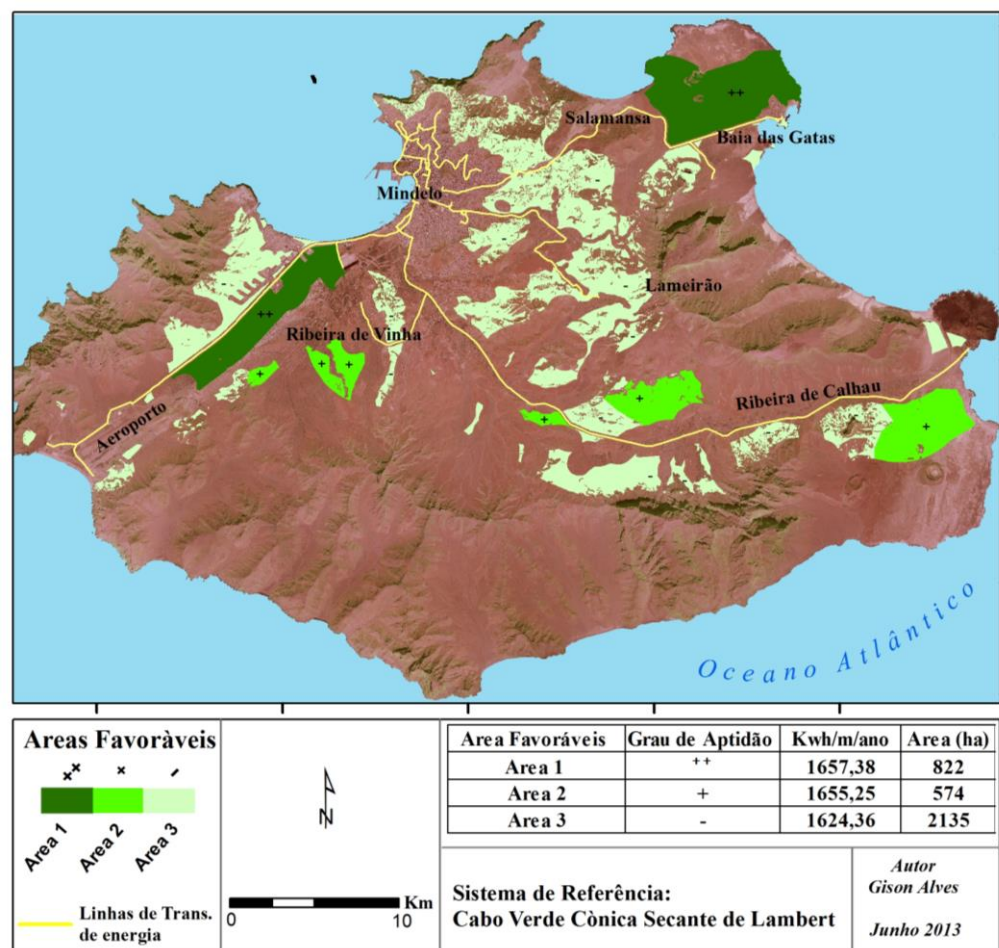
Na Tabela 7 são apresentados os fatores que justificam a aptidão de cada uma dos 3 grupos de áreas referidos anteriormente, e por conseguinte o que torna uma mais favorável que a outra.

Tabela 7 Fatores que justificam a grau de aptidão dos 3 grupos de áreas para instalação de parques solares

<b>Áreas/Grau de Aptidão</b>	<b>Justificação das escolhas</b>
Área 1 (++)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilidade substancial de energia solar incidente na área;</li> <li>• Proximidade à rede de transporte de energia, de modo a minimizar os custos de conexão da energia produzida na rede de distribuição;</li> <li>• Proximidade à rede viária, também para minimizar os custos de instalação e manutenção;</li> <li>• Proximidade aos pontos de consumo (núcleos urbanos);</li> <li>• Maior disponibilidade de área em hectares, e por conseguinte maior capacidade de instalação de módulos fotovoltaicos;</li> <li>• Declive baixo ou áreas planas;</li> <li>• Situados em área de solos nu</li> <li>• Baixo impacto ambiental.</li> </ul>
Área (+)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distância razoável à rede de transporte de energia elétrica;</li> <li>• Distância razoável à rede viária;</li> <li>• Menor capacidade, em termos de área para instalação de módulos fotovoltaicos;</li> </ul>
Área (-)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distante da rede de transporte de energia e da rede viária;</li> <li>• Demasiado próximo dos núcleos urbanos, o que pode causar poluição visual;</li> <li>• Área disponível em hectares pequena ou insuficiente para instalação de módulos fotovoltaicos;</li> <li>• Declives mais acentuados</li> </ul>

Na Figura 40, é apresentada o mapa final, com as áreas com aptidão para instalar parques solares.

No mapa é apresentada os 3 grupos de áreas, e cada uma com a sua respetiva área em metros quadrados e a media da radiação solar incidente em cada uma delas durante o ano em KWh/m<sup>2</sup>.



*Figura 40 Áreas favoráveis finais*

As áreas classificadas como Área 1, apresentam as condições mais favoráveis, cobrindo uma área de cerca de 822 hectares, com uma média de energia solar incidente de cerca de 1657 kWh/m<sup>2</sup>. Apesar dos três grupos de área apresentarem uma média semelhante em termos de radiação solar, fenómeno que é característico de quase toda a ilha, ainda assim, a Área 1, apresenta um nível maior de energia solar, do que as duas restantes áreas. Estas áreas localizam-se a uma distância razoável do principal ponto de consumo da ilha, que é a cidade do Mindelo, encontrando-se nem tão próximo, nem tão longe da cidade e das populações. Pode-se concluir que estas áreas cumprem perfeitamente os critérios legais de ordenamento e planeamento territorial dos recursos energéticos definidas na Decreto-Lei nº 1/2011 de 3 Janeiro de 2011.

As Áreas 1 e 2, também cumprem os critérios inicialmente definidos, pois possuem uma radiação solar incidente bastante considerável, porém possuem outras características que as tornam menos favoráveis que o grupo 1. Por exemplo no grupo de Área 2, tem uma média de radiação solar de 1655 KWh/m<sup>2</sup>/ano, de resto muito próximo das Áreas 1, porém a maior parte deles encontram-se mais distante dos pontos de consumo. Caso se instala um empreendimento de produção de energia solar nessas áreas, iriam implicar maior custo para injetar a energia produzida na rede.

O terceiro grupo, que cobre uma área total de 2135 hectares, é maior com as duas primeiras áreas, porém se analisarmos geometricamente cada um dos polígonos neste grupo de áreas, constata-se que a maior parte deles apresentam uma área insuficiente ou com uma capacidade muito reduzida para instalação de parques solar, para além de muitos deles também se encontrarem demasiado próximos da cidade do Mindelo.

## **5. Conclusão e perspectivas futuras**

O trabalho desenvolvido nesta dissertação, com intuito de quantificar a radiação solar na ilha de São Vicente e localizar áreas mais favoráveis para exploração energia elétrica a partir da energia solar, através dos sistemas de informação geográfica em combinação com outros métodos e técnicas, demonstrou a capacidade dos SIG de modelar e simular as restrições físicas, ambientais e económicas.

A aplicação do modelo da radiação solar, incorporado nos SIG, é de grande utilidade na medida em que, permite calcular a energia solar em diferentes escalas temporais, obtendo resultados com maior rapidez e bastante credíveis, indispensáveis para avaliar o potencial solar para a implementação de empreendimentos de energia elétrica proveniente da exploração dos recursos solares. O modelo é de fácil aplicação, necessitando de apenas de simples *input* como o MDT e a latitude do lugar que se pretende estudar. Porém, é preciso ter cuidado com nível de exatidão dos dados de entrada, pois, erros nos dados podem distorcer os resultados.

Na avaliação do potencial de energia solar na produção de energia fotovoltaica, a aplicação do modelo da *Solar Analyst* e os resultados obtidos mostram que a metodologia pode ser aplicada a outras áreas do arquipélago.

A ilha de São Vicente dispõe de um elevado potencial em termos de energia solar, que melhor aproveitado contribuirá para redução da dependência energética dos combustíveis fósseis.

O mapa da radiação solar resultante da aplicação da metodologia da *Solar Analyst*, foi utilizado como critério indispensável para localização de áreas com aptidão para receber empreendimentos de produção de energia elétrica a partir da energia solar na ilha de São Vicente.

Para além de quantificar o potencial energético solar de um local para a produção de energia fotovoltaica, o modelo solar pode ser aplicado em outras áreas de estudo, como a agricultura etc.

Devido a indisponibilidade de dados não se utilizou neste trabalho um modelo digital de superfície (MDS), que incluísse os dados relativamente a altura dos edifícios, o que tornaria o modelo mais robusto principalmente nas áreas urbanas, onde as edificações criam zonas sombrias, que só pelo MDT não se podem quantificar.



A utilização da técnica de análise multicritério aliado aos SIGs, mostrou-se útil e objetiva na medida em que permite tomar proactivamente a melhor decisão na implementação de qualquer infraestrutura numa determinada área. De um modo geral pode-se concluir que a aplicação dessa técnica em combinação com o SIGs, cumpriu todos os propósitos pretendidos, mostrando ser um método eficaz para a tomada de decisão de âmbito espacial. Este fato ficou comprovado no caso de estudo apresentado nesta dissertação.

A metodologia aplicada, foi adaptada ao contexto do caso de estudo, de acordo com os dados geográficos disponíveis, e que eram possíveis obter, para que a metodologia funcionasse. Mas o método pode ser facilmente adaptado e aplicado a outras regiões.

Em suma conclui-se que todos os objetivos pretendidos foram atingidos, face a indisponibilidade de alguns dados, que pudesse dar maior robustez a análise.

De modo a dar continuidade e o aperfeiçoamento da metodologia seguida nesta dissertação sugere-se:

- i) A aplicação dos modelos SIG e a técnica de análise multicritério na análise de outros sistemas de produção de energia elétrica proveniente de fontes renováveis, nomeadamente a eólica;
- ii) Estender a metodologia para todo o arquipélago de Cabo Verde;
- iii) Aplicar o modelo solar com base nos SIG, para avaliar a produção de energia fotovoltaica a partir de dispositivos incorporados nos edifícios.

## **Bibliografia**

- Alves, L.M , Costa, A.L., & Carvalho, M.G. (1999). Analysis of potencial for market penetration of renewable energy technologies in peripheral islands. 311-317.
- Amador, J. G, & Domínguez, J. (2005). Application of geographical information systems to rural electrification with renewable energy sources. 1897–1912.
- Amador, J.G. (2000). *Análisis De Los Parámetros Técnicos En La Aplicación De Los Sistemas De Información Geográfica A La Integración Regional De Las Energías Renovables En La Producción Descentralizada De Electricidad*. (Doctor), Universidad Politécnica De Madrid, Madrid.
- Amaral, Ilídio. (2007). *Santiago de Cabo Verde: A terra e os homens* (U. d. Algarve Ed. Vol. 2).
- Aydin, N.Y. (2009). *Gis-Based Site Selection Approach For Wind And Solar Energy Systems: A Case Study From Western Turkey*.
- Aydin, N.Y, Kentel, E, & Duzgun, S. (2010). GIS-based environmental assessment of wind energy systems for spatial planning: A case study from Western Turkey. 364–373.
- Baban, S. M.J, & Parry, T. . (2001). Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK. 59–71.
- Baria, I., & Fernandes, Jr. (2010). Avaliação Do Uso De Ahp Em Um Ambiente Sig Para Priorização De Intervenções Em Um Sistema De Transporte Ferroviário. *Pluris*, 1-12.
- Belward, A., Bisselink, B., Bódis, K., Brink, A., Dallemand, J.-F., De Roo, A, . . . Willemen, L. (2011). Renewable energies in Africa. In F. Monforti (Ed.), (pp. 1-62). Italia.
- Bravo de Laguna, J. (1985). Plateaux insulaires et zone économiques exclusive de la République de Cap-Vert. Rapport technique (pp. 1-23). Praia: PNUD/FAO–project CVI/82/003.
- Brito, L.P. (2012). O Turismo em São Vicente face às Alterações Climáticas (pp. 1-39): KSIDS.
- Carrion, J.A, Estrella, A. E, Dols, F.A, & Ridao, A.R. (2008). The electricity production capacity of photovoltaic power plants and the selection of solar energy sites in Andalusia. *Renewable Energy*, 545–552.
- Carrion, J.A, Estrella, A. E, Dols, F.A, Toro, M.Z, Rodríguez, M, & Ridao, A.R. (2007). Environmental decision-support systems for evaluating the carrying capacity of land areas: Optimal site selection for grid-connected photovoltaic power plants. *Renewable Energy*, 2358–2380.

- Carver, S. J. (1991). Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 321-339.
- CECALE , Confederación de Organizaciones Empresariales de Castilla y León. (2002). *Energías renovables en Castilla y León. solar y eólica* (C. y. T. Junta de Castilla y León -Consejería de Industria Ed.).
- Chaudhry, R. . (2010). Using Multi-Criteria Evaluation to Determine Suitable Sites for Developing Wind Farms in Massachusetts. 1-16.
- Cruz, O. D. (2007). *Monitorização da Flora Autóctone da Ilha de São Vicente*. (Lincenciatura Monografia), Instituto Superior de Educação - ISE, Praia.
- Davis, C. . (1998). *Bancos De Dados Geográficos Para Aplicações Urbanas* (pp. 1-27).
- Demonti, R. (2003). *Processamento Da Energia Elétrica Proveniente De Módulos Fotovoltaicos*. (Doutoramento), Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Dinis, A. C.; & Matos, G. C. (1994). *Carta de zonagem agro-ecológica e da vegetação de Cabo Verde : VI - Ilha de S. Vicente : VII - Ilha de Santa Luzia* (IICT Ed.). Lisboa.
- DIRECTIVA 2001/77/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 27 de Setembro de 2001 relativa à promoção da electricidade produzida a partir de fontes de energia renováveis no mercado interno da electricidade, 2001/77/CE C.F.R.
- Domínguez, B. J., Pinedo, P. I., & Augusto, G. J. (2008). Herramientas Sig Para La Integración De Recursos De Energías Renovables En Electrificación Rural. *Inti-Gis*. 552-563.
- Domínguez, F. J. (2002a). *La Integración Económica Y Territorial De Las Energías Renovables Y Los Sistemas De Información Geográfica*. (Doctoramento), Universidad Complutense De Madrid, Madrid.
- Domínguez, F. J. (2002b). *La Integración Económica Y Territorial De Las Energías Renovables Y Los Sitemas De Información Geográfica*. (Doutoramento), UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID, Espanha.
- Dominguez, F. J, Pinedo, P. I , & Gonzalez, G, A. (2008). *Research activities in renewable energy sources integration with GIS at CIEMAT*. Paper presented at the iEMSs 2008: International Congress on Environmental Modelling and Software Integrating Sciences and Information Technology for Environmental Assessment and Decision Making, Madrid, Espanha.
- Eastman, R.J , Jiang, H., & Toledano, J. . (1998). *Multi-criteria and multi-objective decision making for land allocation using GIS* (Vol. 9). Worcester, Massachusetts, USA: The Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis

- ECREEE, ECOWAS Regional Centre for Renewable Energy and Energy Efficiency. (2012). ECREEE na COP17 (Vol. IV, pp. 1-16). Durban, Africa do Sul.
- EEM, Empresa de Eletricidade da Madeira (2005). Eletricidade da Madeira - SIT - GeoEEM. from [http://www.eem.pt/index.php?option=com\\_content&task=view&id=286&Itemid=386](http://www.eem.pt/index.php?option=com_content&task=view&id=286&Itemid=386)
- ELECTRA, SARL. (2012). Relatorio de Contas de 2011 (pp. 1-68). Mindelo, São Vicente.
- EROT. (2012). Esquema Regional da Ilha de São Vicente. Caracterização e Diagnostico Ambiental (Vol. II, pp. 1-106): DGOTDU.
- ESRI , & Miner and Miner. (2001). *Electric Distribution: ArcGIS Data Models*. USA: ESRI.
- Ferreira, H. S, & Santos, A. M. (2010). *Sig Aplicado A Gerência De Rede De Distribuição Elétrica Rural Da Área Litorânea De Utinga, Localizada Nos Municípios Do Conde E Alhandra- Pb*. Paper presented at the III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.
- Fu, P., & Rich, P.M. (2000). *The Solar Analyst 1.0. User Manual* HEMI (Ed.)
- Fu, P., & Rich, P.M. (2002). A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 25-35.
- Gabinete de Advocacia Consultoria e Procuradoria Jurídica, & SKM. (2009). Estudo de Impacte Ambiental - *Cape Verde Wind Farm Extension Project* (pp. 1-41). São Vicente.
- Garcia, J.N. (2010). *Análise e Modelização da Rede Eléctrica da Ilha de São Vicente - Planeamento da Rede no Horizonte de Médio Prazo*. (Mestrado), ISEL, Lisboa.
- Gardner, D.E. (1955). *Beach -Sand, Hea Vy-Mineral Deposits Of Eastern Australia*. Australia.
- Gomes, A.M, & Pina, A.F. (2003 ). *Problemas De Recursos Hídricos Em Ilhas Exemplo Da Ilha De Santiago - Caso Da Bacia Hidrográfica Da Ribeira Grande Da Cidade Velha - Caso Da Bacia Hidrográfica Da Ribeira Seca*. Paper presented at the SILUSBA -Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa.
- Gomes, N.M.P. (2011). *Integração De Dados Lidar Com Imagens De Muito Alta Resolução Espacial Para Determinação De Áreas Urbanas Com Potencial Solar*. (Mestrado), Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Hansen, S.H. (2005). GIS-based Multi-Criteria Analysis of Wind Farm Development. 75-87.
- Hassan, T., & Akhtar, F . (2012). Mapping of Power Distribution Network using Geographical Information System (GIS). 2(6), 343-347.

- Hetrick, W.A, Rich, P.M, & Weiss, S.B. (1993). *Modeling insolation on complex surfaces*. Paper presented at the Thirteenth Annual ESRI User Conference.
- Hofierka, J. (1997). *Direct solar radiation modelling within an open GIS environment*. Paper presented at the Proceedings of the Joint European GI Conference, Vienna.
- Hofierka, J., & Šúri, Marcel. (2002). *The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications*. Paper presented at the Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference, Trento, Italy.
- Izquierdo, S, Rodrigues, M, & Fueyo, N. (2008). A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. 929 - 939.
- Janke, J. R. (2010). Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado. 2228-2234.
- Jucá, S.C., Marques de Carvalho, P.C, & Aguiar Junior, J.S. (2006). A relevancia dos sistemas de informação geográfica no desenvolvimento das energias renovaveis. *Ciencias & Cognição*, 9, 131 - 136.
- Kaijuka, E. (2006). GIS and rural electricity planning in Uganda.
- Kale, U.D., & Lad, R. (2006). GIS integration with SCADA, DMS & AMR in Electrical Utility. Kale U. D et al; .  
[http://gisdevelopment.net/proceedings/mapindia/2006/energy/mi06ene\\_184.htm](http://gisdevelopment.net/proceedings/mapindia/2006/energy/mi06ene_184.htm)
- Karekezi, S. (2002). Renewables in Africa - Meeting the Energy Needs of the Poor.
- Karekezi, S., & Kithyoma, W. (2003). Renewable Energy in Africa: Prospects and Limits. Dakar, Senegal: AFREPREN.
- Kassner, R., Koppe, W., Schüttenberg, T. , & Bareth, G. . (2008). *Analysis Of The Solar Potential Of Roofs By Using Official Lidar Data*. Paper presented at the The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. , Beijing 2008.
- Kaushik, K, & Vinayagam, S.K. (Sd). Electric Utility Network
- LEADER II. (1999). Fonte de energia renováveis, fontes de desenvolvimento sustentável. UK-Cumbria: Observatório Europeu LEADER/AEIDL.
- Lebeña, E.P., & Costa, J. C. (1996). *Conversão Térmica Da Energia Solar* Vol. I. S. P. d. E. S. (SPES) (Ed.)
- Malczewski, J. (2000). On the Use of Weighted Linear Combination Method in GIS: Common and best practice Approaches.
- Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 703-726.

- Mateus, D.M, & Costa, L.M. (2004). *Utilização De Sig Para O Planeamento De Electrificação Rural Com Produção Descentralizada*. (Licenciatura), Universidade do Porto.
- Matos, J. (2008). *Fundamentos de Informação Geográfica*. Lisboa: LIDEL.
- MECC. (2008). Política energética de Cabo Verde. Praia, Cabo Verde.
- Monteiro, A. D. . (2012). *O impacto das energias renováveis na economia dos países emergentes: o caso de Cabo Verde*. (Mestrado), ISCET-IUL, Lisboa.
- Nawaz-ul-Huda, S., Burke, F, Azam, M, & Naz, S. (2012). GIS for power distribution network: A case study of Karachi, Pakistan.
- Néry, F. (2007). Nomenclatura CORINE Land Cover : versão portuguesa comentada. Lisboa: Instituto Geográfico Português.
- ONU. (1987). Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. In W. C. o. E. a. Development (Ed.), (Vol. 1): ONU.
- ONU. (2012). *O Futuro Que Queremos*. Paper presented at the RIO+20, Rio de Janeiro.
- Ozturk, D., & Batuk, F. (2011). Implementation Of Gis-Based Multicriteria Decision Analysis With Vb In Arcgis. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 10, 1023–1042.
- PERCV. (2011). Plano Energético Renovável de Cabo Verde. Algés, Portugal Gesto Energia SA.
- REN. (2004). Rede Eléctrica Nacional: GesServ e GeoServ da REN optimizam relação com proprietários.
- Rocha, A., Costa, A., & Sanches, R. (2011). Clima e Cenários Climáticos em Cabo Verde e São Tomé e Príncipe In KSIDS (Ed.). Aveiro, Portugal: KSIDS.
- Rocha, R. . (2010 ). *Aplicação Dos Sistemas De Informação Geográfica Em Estudos De Caracterização Biofísica Da Ilha De Santo Antão Em Cabo Verde*. (Master), Universidade de Trás-os-Montes e Alto do Douro
- Rodrigues, D.S. (2001). *Avaliação Multicritério De Acessibilidade Em Ambiente SIG*. (Mestrado), Universidade do Minho, Braga.
- Saaty, T.S. (1980). The Analytic Hierarchy Process.
- Saaty, T.S. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*.
- Salawudeen, O. S, & Rashidat, U. (2006). Electricity Distribution Engineering and Geographic Information System (DeGIS).

- Segurado, R., Krajacic, G., Duic', N. , & Alves, L (2011). Increasing the penetration of renewable energy resources in S. Vicente, Cape Verde. 466–472.
- Simões, T.M.V.S. (2004). *Base De Dados Do Potencial Energético Do Vento Em Portugal – Metodologia e Desenvolvimento*. (Mestrado), Universidade Lisboa.
- SOLARGIS TEAM. (1994). First Progress Report.
- Sorensen, B. (2001). GIS management of solar resource data. 503-509.
- Sorensen, B. , & Meibom, P. (1999). GIS Tools for Renewable Energy Modelling 1262-1267.
- Tiba, C., Candeias, A.L.B., Fraidenraich, N, Barbosa, E.M.S, C, Neto P.B., & Melo Filho, J.B. (2010). A GIS-based decision support tool for renewable energy management and planning in semi-arid rural environments of northeast of Brazil. 2921 - 2932.
- Twidell, J. , & Weir, T. (2006). *Renewable Energy Resources* (Vol. 2). New York: Taylor & Francis.
- Vicari, M.B. (2012). *Uso de SIG e Análise Multicritério para Levantamento do Potencial de Implantação de Usinas Eólica e Solar no Rio Grande do Sul*. (Mestrado), Universidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul.
- Voogd, J.H. (1982). *Multicriteria evaluation for urban and regional planning* London: Pion:Ldt.
- Wittmann, H. , Bajons, P. , Doneus, M., & Friesinger, H. . (1997). Identification Of Roof Areas Suited For Solar Energy Conversion Systems. *Renewable Energy*.
- Zambon, K.L, A.E, Carneiro, Silva, A. N. , & Negri, J.C. (2005). Análise De Decisão Multicritério Na Localização De Usinas Termoelétricas Utilizando SIG.

## **Legislação**

- Decreto-Legislativo nº 6/2010, de 13 de Fevereiro, que estabelece as Bases do Ordenamento do Território e Planeamento Urbanístico (2010).
- Decreto-Legislativo nº 1/2011. Estabelece as disposições relativas à promoção, ao incentivo e ao acesso, licenciamento e exploração inerentes ao exercício da actividade de produção independente e de auto-produção de energia eléctrica (2011).
- Decreto-Legislativo nº 3/2003, de 24 Fevereiro. Estabelece o regime juridico dos espaços naturais, paisagens, monumentos e lugares (2003).
- Decreto-Legislativo nº 22/2008, de 30 de Junho, que aprova o Estatuto das Estradas Nacionais, bem como ao regime das servidões públicas, nos termos da lei. (2008).

## **Anexos**



## **Anexo 1 - Glossário de terminologia energética utilizada nesta dissertação**

Este glossário segue a terminologia usada pelo *Dicionário de terminologia energética, 2001 3ª edição, do Conselho Mundial de Energia*.

**Energia da rede** – energia entregue a das redes de distribuição. Estas podem ser elétricas, de gás etc.

**Célula fotovoltaica** – dispositivo que utiliza o efeito fotovoltaico para converter diretamente a radiação solar em energia elétrica.

**Central solar** – instalação de produção de energia elétrica a partir da radiação solar.

**Carga** – é o valor num dado instante, da potência elétrica fornecida ou absorvida, em qualquer ponto de um sistema, determinada por uma medida instantânea ou por integração da potência ou por integração da potência durante um determinado intervalo de tempo. A carga pode referir-se a um consumidor, um aparelho, um conjunto de consumidores ou aparelhos, ou a rede.

**Módulo solar** - montagem de células solares interligadas que constituem o elemento de base manipulável e transportável de um sistema fotovoltaico. A densidade de ocupação define a relação entre a superfície total de todas as células e a superfície do módulo sobre o qual elas estão dispostas.

**Painel solar** – conjunto de módulos solares colocadas em série, em paralelo ou de forma mista.

**Potência elétrica máxima** – é a maior potência elétrica, que pode ser produzida numa central ou num grupo durante um período de funcionamento prolongado, supondo que se encontra em bom funcionamento a totalidade das suas instalações e em condições ótimas de alimentação.

**Potência elétrica disponível** – potência máxima que em cada momento e num determinado período, poderá ser produzida na central ou no grupo, na situação real em que se encontra no momento.

**Potência elétrica produzida** – potência ativa efetivamente produzida. Mede-se como se tratasse de um valor momentâneo, devendo indicar o momento a que se refere. Contudo, por convenção pode ser expressada a partir da energia produzida num curto intervalo de tempo (relação entre a energia produzida e o tempo de funcionamento).

**Potência instalada de uma central produção** – é definida em números inteiros pelo somatório das potências elétricas ativas nominais dos grupos geradores na central.

**Potência instalada no consumidor** – é a soma de todos os aparelhos utilizados ou suscetíveis de o serem que podem consumir da rede de distribuição a que o consumidor está ligado.

**Potência contratada** – potência acordada com o fornecedor, em geral é inferior a potência instalada no consumidor.

**Sistema energético** – corpos ou dispositivos que contém energia como características de origem ou em consequência de ações exteriores.

**Watt (W)** – unidade de potência. É a potência de um sistema energético, no qual é transferida uniformemente uma energia de 1 joule durante 1 segundo.